

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA POR SEGUNDA LEY, DEL SECADO
POR CONVECCIÓN DE TOMATE Y PIÑA EN UN SECADOR DE TÚNEL**

MONOGRAFÍA PRESENTADO POR:
STEVE ALFARO CALIZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

TUTOR:
DR. RAFAEL GAMERO

MANAGUA, NICARAGUA, 2016

DEDICATORIA

Este logro lo dedico:

A Dios, por ayudarme en todo y siempre ayudarme a lograr mis propósitos.

A mis padres, Alvaro Alfaro y Jeanette Cáliz, por todo el apoyo y paciencia que me han tenido para que yo culminara mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Dr. Rafael Gamero por introducirme al tema de secado y a su análisis energético y por darme su apoyo constante en el desarrollo de esta monografía.

A todos mis amigos y docentes que me apoyaron constantemente a lo largo de estos años, especialmente a los que me ayudaron a armar el equipo en su nuevo sitio y lograr su funcionamiento.

A todos los docentes y responsables de laboratorio, especialmente Juan Alonso, que me ayudaron en todo el proceso de revisión bibliográfica, experimentos y redacción de la monografía.

A todas las personas que de alguna manera influyeron en este logro personal.

Gracias a todos.

RESUMEN

Esta monografía se ha centrado en el estudio de la cinética de secado y la eficiencia por segunda ley de la termodinámica del secado por convección de tomate y piña en un secador de túnel para fines de creación, diseño, optimización de rendimiento de equipos industriales y las curvas características de secado de ambos vegetales para fines base de datos, simulación y modelación. Se realizaron experimentos con rodajas de tomate y piña en un secador de túnel, con una torre de sílica gel para obtener aire seco con una velocidad de 0.94 m/s y resistencias eléctricas con un controlador de temperatura a tres set points: 100°C, 115°C y 130°C. Las muestras se secaron hasta llegar al equilibrio con las condiciones del equipo. Con los datos experimentales se calcularon: las curvas de secado, velocidad de secado, curvas características de secado, entalpía, entropía, exergía y la eficiencia por segunda ley o eficiencia exergética. Se lograron obtener curvas características de secado satisfactoriamente coincidentes. Ambos vegetales poseen igual número de entalpía, entropía y exergía. La eficiencia exergética de la piña es 0.0077% y el tomate 0.0119%, siendo el tomate es más ideal eficiente exergéticamente comparando ambos vegetales.

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA

La monografía realizada por el Br. Steve Alfaro Cáliz titulada “*Determinación de la Eficiencia por Segunda Ley del Secado por Convección de Tomate y Piña en un Secador de Túnel*” es un trabajo más en la línea de investigación de secado de productos naturales realizados en la Facultad de Ingeniería Química. Este trabajo tiene la importante característica de que aborda el tema del aprovechamiento de la energía en los procesos de secado, específicamente en este caso, el secado convectivo.

El trabajo del Br. Alfaro Cáliz presenta el estudio de la cinética de secado de dos vegetales de consumo cotidiano: el tomate y la piña. El trabajo experimental con estos dos vegetales genera sus respectivas curvas características de secado (CDC), las cuales pasan a ser parte de la base de esas curvas de diferentes vegetales iniciada por Sánchez (1993). Sin embargo, el valor agregado de este trabajo reside en el estudio del aprovechamiento energético en el secado de túnel durante el proceso de secado de esos vegetales. Para ello, el Br. Alfaro Cáliz desarrolló balances de masa y energía desde el lado de la corriente gaseosa, datos con los cuales se puede ilustrar la historia de cambio de los parámetros analizados.

Además, del análisis de los parámetros mencionados, el presente trabajo aborda el aprovechamiento de la energía en el secado convectivo mediante un análisis de Segunda Ley de la Termodinámica. De esta forma, se incluye por primera vez aspectos termodinámicos y el concepto de exergía en un trabajo de secado y como trabajo de monografía de grado de la Facultad de Ingeniería Química. La exergía y la eficiencia por Segunda Ley, son parámetros termodinámicos para la evaluación integral del uso de la energía disponible en un sistema, que puede conducir de manera más clara al entendimiento de su relación con aspectos ambientales y económicos.

El trabajo de diploma del Br. Alfaro Cáliz constituye una gama contenidos de la disciplina de Ingeniería Química, entre las cuales pueden distinguirse las especialidades de Balances de Materia y Energía, Termodinámica y Transferencia de Masa; además, contiene el manejo de la instalación experimental que incluye transporte de aire, desecado a través de una columna de adsorción, calentamiento de aire mediante un sistema de control de temperatura y toma simultánea de datos del aire y el sólido.

De forma general, el presente estudio está estructurado de forma sistemática, incluyendo una metodología adecuada, con lo cual, se generan nuevos aportes a la línea de investigación de secado. Adicionalmente, el documento final de este estudio puede ser referencia para introducir experiencias propias a los contenidos de las disciplinas del currículum de Ingeniería Química correspondientes.

Por lo antes expuesto, solicito al Honorable Tribunal Calificador, otorgar Br. Steve Alfaro Cáliz el Título de Ingeniero Químico.

Rafael Gamero, Ph.D.

Tutor

Tabla de contenido

1. Introducción	8
2. Objetivos	10
2.1. Objetivo general.....	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. Revisión de literatura	11
3.1. Frutas	11
3.2. Piña	11
3.3. Tomate	12
3.4. Secado.....	12
3.5. Proceso de difusión.....	13
3.6. Curva de secado	13
3.7. Curva de velocidad de secado.....	14
3.8. Curva característica de secado	16
3.9. Fundamentos de la primera ley de la termodinámica	17
3.10. Concepto de energía.....	17
3.11. Energía y la primera ley de la termodinámica	17
3.12. Aspectos económicos de energía	19
3.13. Gestión de la energía.....	19
3.14. Segunda ley de la termodinámica	19
3.15. Entropía.....	20
3.16. Exergía	20
3.17. Eficiencia por segunda ley de la termodinámica	21
4. Metodología	23
4.1. Material.....	23
4.1.1. Tomate	23
4.1.2. Piña	23
4.2. Trabajo experimental	23
4.2.1. Equipo.....	24
4.2.2. Experimento.....	25
4.2.3. Diseño experimental	25

4.2.4.	Selección del diseño experimental	27
4.2.5.	Diseño de la matriz experimental ³	30
4.3.	Adquisición de datos.....	33
4.4.	Procesamiento de datos y cálculos.....	34
4.4.1.	Curva de velocidad de secado	35
4.4.2.	Curva característica de secado.....	35
4.4.3.	Balance de masa en la corriente de aire.....	35
4.4.4.	Calculo de entalpía	36
4.4.5.	Calculo de entropía.....	37
4.4.6.	Calculo de exergía	38
4.4.7.	Calculo de eficiencia por segunda ley de la termodinámica	38
5.	Discusión de resultados	39
5.1.	Introducción	39
5.2.	Influencia de la temperatura y análisis de la curva de secado y de velocidad de secado	39
5.3.	Curva característica de secado	48
5.4.	Cambio de temperatura de la piña y tomate	50
5.5.	Entalpía, entropía, exergía y eficiencia por segunda ley	51
5.5.1.	Variación de entalpía vs tiempo	51
5.5.2.	Variación de entropía vs tiempo.....	54
5.5.3.	Variación de exergía vs tiempo	57
5.5.4.	Variación de eficiencia exergética vs tiempo	59
6.	Conclusiones	61
7.	Recomendaciones.....	64
8.	Nomenclatura	65
9.	Bibliografía.....	68
10.	Apéndice.....	69

1. INTRODUCCIÓN

La deshidratación es una de las formas más antiguas de procesar alimentos. Consiste en eliminar una buena parte de la humedad de los alimentos para su preservación. Se considera de mucha importancia pues esto nos permite alargar la vida útil de las frutas y vegetales para poder tener acceso a mercados más distantes y podremos contar con ellas en épocas que normalmente no se producen, logrando así mejores precios.

Se ha hecho evidente en los últimos años que los recursos energéticos, especialmente gas natural y petróleo, son limitados. En consecuencia, todos los sectores industriales en todas las partes del mundo necesitan identificar métodos más eficientes de utilización de la energía. En el caso de secado, el contenido inicial de humedad de un producto se puede reducir mediante el uso de otros métodos que son más eficientes energéticamente (Mujumdar, 2006).

La primera ley de la termodinámica enuncia que la energía interna de un sistema, el trabajo y el calor no son más que diferentes manifestaciones de energía. Es por eso que la energía no se crea ni se destruye, sino que, durante un proceso solamente se transforma en sus diversas manifestaciones; sin embargo, la segunda ley establece que no existe un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor de una fuente y la conversión íntegra de este calor en trabajo.

Por lo tanto, es importante calcular la eficiencia por segunda ley de las instalaciones de secado de algunas frutas y vegetales para optimizar el consumo de energía.

Las frutas y vegetales secos tienen una historia larga y exitosa, a pesar de su valor comercial actualmente desequilibrado, y se debe de considerar una comodidad latente en todo el mundo, con un futuro brillante en un siempre creciente mercado. Como cualquier otro producto alimenticio comercializado en todo el mundo, existen hoy en día frutas y vegetales secos dentro de una cadena de suministro complejo que consta de los operadores económicos multifactoriales y procesos más o menos sofisticados de materias primas perecederas e impredecibles. La cuidadosa coordinación de estos factores entregará productos finales perfectamente ajustados a los cada vez más altos estándares y expectativas de los usuarios finales y consumidores (Hui et al., 2010).

El secado de frutas es probablemente el procedimiento más antiguo para su conservación. Fue realizado originalmente en una forma bastante primitiva (la difusión de la fruta en el aire caliente de una chimenea o estufa, estufa de la cocina o en el horno), proporcionando así oscuros "productos horneados". El secado solar es todavía un proceso común en los países del sur y tropical para la obtención de rodajas secas de manzana, albaricoques, melocotones o peras o frutas tropicales como dátiles, higos o pasas. El pre-secado se consigue a menudo con el sol y secado adicional por el calor artificial en las instalaciones de secado (Belitz et al., 2009).

Las nuevas tendencias de los consumidores, su preocupación sobre los problemas de salud y la dieta para mantenerse en forma y sanos, han impulsado unos nuevos hábitos de consumo, principalmente de fruta deshidratada por su aporte de fibra, sales minerales y su contribución en la regulación de las funciones intestinales.

Los vegetales deshidratados, en trozos y gránulos, representan una posibilidad única de suministro de alimentos en las regiones aisladas de los países en desarrollo por su facilidad de conservación sin necesidad de la cadena de frío, favoreciendo el uso de los excedentes de las cosechas.

Estudios previos realizados en el área de secado de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) con vegetales han sido la determinación de las curvas características de secado de algunos vegetales para crear una base de datos de esas curvas, las cuales fueron desarrolladas por Sanchez, (1993). Es importante mencionar que esta tesis incluye vegetales distintos para ampliar la base de datos de curvas características de secado. Este trabajo constituye el primer estudio energético del secado de vegetales desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica, realizado en la Facultad de Ingeniería Química de la UNI.

La presente investigación está dirigida a determinar la eficiencia por segunda ley del secado por convección de tomate y piña con el fin de disponer de información requerida en el diseño, evaluación de equipos y procesos de secado para formular nuevos alimentos deshidratados, conservas, sopas, polvos y nuevos sabores de los ya existentes, teniendo una planta exergéticamente eficiente exhibiendo un alto ahorro energético y por lo tanto más ganancias para la empresa.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia exergética del secado por convección de tomate y piña en un secador de túnel.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudiar la cinética de secado de tomate y piña mediante la obtención de la curva característica de secado.

Desarrollar el cálculo de exergía y eficiencia exergética en el proceso de secado de tomate y piña por convección en un secador de túnel en el tiempo.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

Las verduras se definen como las partes frescas de plantas que, crudas, cocidas, enlatadas o procesadas de alguna otra manera, forman parte de una nutrición humana adecuada. Las frutas de árboles perennes no se consideran verduras. Semillas maduras también están excluidas (guisantes, habas, granos de cereal, etc.) Desde el punto de vista botánico, las verduras se pueden dividir en algas, hongos, hortalizas de raíz (zanahorias), tubérculos (papas, batatas), bulbos y el tallo o pedúnculo (coles, perejil), de hoja (espinaca), inflorescencia (brócoli), semillas (guisantes), frutas y hortalizas (tomate) (Belitz et al., 2009).

La composición de los vegetales puede variar significativamente dependiendo de la variedad y origen. La cantidad de materia seca en la mayoría de los vegetales está entre 10 y 20%. El contenido de nitrógeno está en el intervalo de 1-5%, 3-20% carbohidratos, lípidos 0,1-0,3%, fibra cruda alrededor de 1%, y minerales cerca de 1%. Algunos tubérculos y las semillas vegetales tienen un alto contenido de almidón y por lo tanto un alto contenido de materia seca. Vitaminas, minerales, sustancias aromatizantes y fibras dietéticas son componentes secundarios importantes (Belitz et al., 2009).

3.1. FRUTAS

Frutas incluyen ambos verdaderos frutos y frutas espurias, así como semillas de plantas perennes cultivadas y silvestres. Las frutas se clasifican comúnmente como frutas pomáceas, frutas de piedra, bayas, frutas tropicales y subtropicales, frutos secos de cáscara dura y frutos silvestres (Belitz et al., 2009).

La composición de frutas puede ser fuertemente influenciada por la variedad y la madurez, por lo que los datos dados deben utilizarse sólo como una guía. El contenido de materia seca de las frutas (bayas y pomme, piedra, cítricos y frutas tropicales) varía entre el 10-20%. Los constituyentes principales son azúcares, polisacáridos y ácidos orgánicos, mientras que los compuestos N-y lípidos están presentes en cantidades menores. Componentes menores incluyen pigmentos y sustancias aromáticas de importancia a la calidad organoléptica, y vitaminas y minerales de importancia nutricional. Las nueces son muy variables en su composición. Su contenido de humedad es inferior al 10%, N-compuestos son aproximadamente el 20% y los lípidos son tan altos como 50% (Belitz et al., 2009).

3.2. PIÑA

La piña es una monocotiledónea perenne que pertenece a la familia de Bromeliaceae, subfamilia Bromelioideae. El Bromelioideae comprende 56 géneros con más de 2.000

especies, que se clasifican en tres subfamilias: Pitcarnioideae, Tillandsioideae y Bromelioideae. Esta última subfamilia muestra una tendencia hacia la fusión de las piezas florales, un rasgo más desarrollado de Ananás. Muchas distinciones, en particular los relacionados con el tamaño del fruto y de la fertilidad, parecen ser el resultado directo de la selección humana en el transcurso de la domesticación (Hui et al., 2010).

La piña es la tercera fruta tropical más importante después de bananas y mangos, y ha sido cultivada en América del Sur desde el siglo XV. Debido a su atractivo sabor dulce, la piña se consume ampliamente como fruta fresca, jugo procesado, y fruta enlatada, y se usa como ingrediente en comidas exóticas. Cinco países: Tailandia, Filipinas, Brasil, China e India, contribuyen a la mayor producción en el mundo (Hui et al., 2010).

La composición de la piña se detalla en el Apéndice 1.

3.3. TOMATE

Es una planta herbácea anual, a veces bienal, erecta, de tamaño muy variable según las variedades.

El fruto es una baya jugosa (el tomate propiamente dicho), de forma generalmente sub-esférica, globosa o alargada y, habitualmente, de unos 8 centímetros de diámetro, cortamente glanduloso-pubescente y verde cuando inmaduro y que toma generalmente un color rojo intenso con la maduración. Las semillas tienen 2,5-3 por 2 mm, son ovoides, comprimidas, lisas o muy velludas, parduscas y están embebidas en una abundante masa mucilaginosa (Hui et al., 2010).

La composición del tomate se detalla en el apéndice 2.

3.4. SECADO

El secado describe el proceso de eliminación de sustancias volátiles térmicamente (comúnmente humedad) para obtener un producto sólido seco. A la humedad contenida en combinación química libre, presente como una solución líquida dentro del sólido o incluso atrapada en la microestructura del sólido, la cual ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro se llama la humedad unida. A la humedad en exceso de la humedad unida se le llama humedad no unida (Mujumdar, 2007).

La cinética de secado está relacionada con los cambios promedios del contenido de humedad del material y la temperatura promedio en ese tiempo, a diferencia de las dinámicas de secado que describen los cambios en la temperatura y perfiles de humedad a través del cuerpo de secado. La cinética de secado permite calcular la cantidad de humedad evaporada, tiempo de

secado, consumo de energía, etc. y está determinado en una medida considerable por las propiedades físicas-químicas del material (Strumillo y Kudra, 1986).

3.5. PROCESO DE DIFUSIÓN

Difusión es el proceso en el cual la materia es transportada de una parte de un sistema a otra como resultado de movimientos moleculares aleatorios (Crank, 1975).

La transferencia de calor por conducción es dada también por movimientos aleatorios moleculares y hay una analogía obvia entre los dos procesos. Esto fue reconocido por Fick (1855), quien fue el primero en colocar la difusión sobre una base cuantitativa adoptando la ecuación matemática de conducción de calor derivado unos años atrás por Fourier (1822).

La teoría matemática de la difusión en sustancias isotrópicas está basada en la hipótesis en que la tasa de transferencia de sustancia difusora por unidad de área de una sección es proporcional al gradiente de concentración medido normal a la sección. Si la masa transferida en un proceso de separación es el contenido de humedad que abandona un sólido poroso, la ecuación de Fick define el flujo de humedad removido por unidad de área según:

$$N_v = -D \frac{dC}{dz} \quad (a) \qquad \frac{dX}{dt} = D_{ef} * \frac{d^2X}{dz^2} \quad (b) \qquad (3.1)$$

donde N_v es la tasa de transferencia por unidad de área de sección, C es la concentración de la sustancia difusora, z la coordenada espacial medida normal a la sección, X el contenido de humedad, t es el tiempo, D_{ef} es la difusión efectiva y D es llamado el coeficiente de difusión (Crank, 1975). La solución a la ecuación (3.1 b), resulta en el comportamiento del contenido de humedad con respecto al tiempo a una profundidad del lecho (z) constante. (León et al., 2006) Desarrolló las curvas de secado para el ácido acetilsalicílico evaluando la solución de Crank de la ecuación (3.1b).

3.6. CURVA DE SECADO

Para construir la curva de secado es necesario graficar los datos de pérdida de humedad en el sólido durante el tiempo del experimento. Estos datos se obtienen experimentalmente bajo condiciones físicas y termodinámicas constantes. Estas condiciones son la temperatura, humedad, velocidad y dirección del flujo del aire a través de la superficie del secado y se grafica después como X (humedad del sólido) vs t (tiempo del experimento).

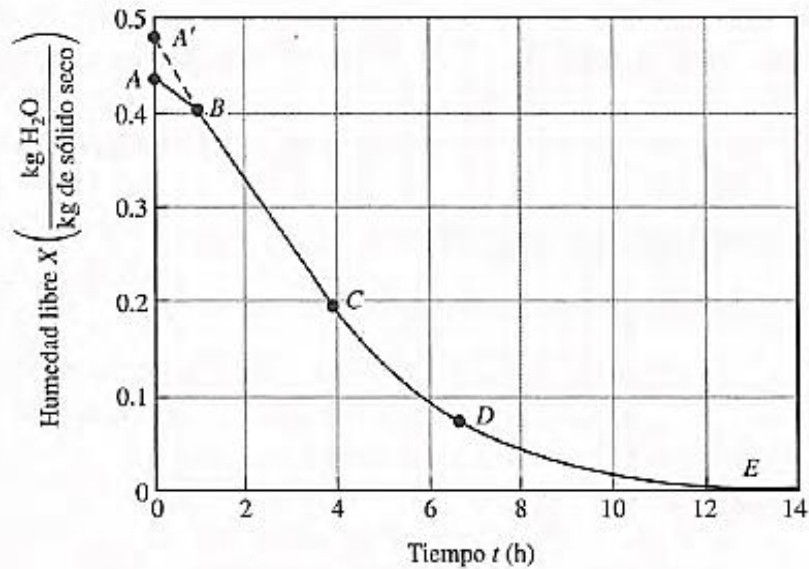


Figura 3.1. X vs t

Donde el tramo AB es cuando el sólido está frío y no presenta pérdida inicialmente por un determinado tiempo de secado. El tramo A' B es cuando el sólido está caliente y presenta pérdidas desde el inicio del tiempo de secado. El tramo BC es un tramo recto, pendiente constante, es cuando la velocidad de pérdida de masa es constante. El tramo CD generalmente es lineal y sucede cuando la velocidad de secado decrece. Se denomina el primer período de velocidad decreciente. El tramo DE es cuando la velocidad de secado disminuye con mas rapidez. Se denomina el segundo período de velocidad decreciente. En algunos casos, el tramo CD no se define claramente, constituyéndose un solo período de velocidad decreciente.

3.7. CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO

Cuando se seca experimentalmente un sólido se obtienen datos que relacionan el contenido de humedad con el tiempo, lo cual constituye la curva de secado. A partir de estos datos se puede graficar una curva del contenido de humedad como función del tiempo, la cual es la versión experimental de la solución a la ecuación de difusión (3.1 b), tal como se muestra en la figura. 5.1. Esta curva será directamente útil para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado. Se puede obtener mucha información si los datos se convierten en velocidades de secado, expresados como N_v [masa / tiempo * área] y se grafican contra el contenido de humedad (figura 3.2). Esto puede hacerse midiendo las pendientes de las tangentes trazadas a la curva o determinando a partir de la curva pequeños cambios en el contenido de humedad X para los cambios pequeños correspondientes en el tiempo t y calculando la velocidad como:

$$N_v = - \frac{m_s * dX}{A * dt} \quad (3.2)$$

dónde: m_s es la masa del sólido seco, A es la superficie húmeda sobre la cual sopla el gas y a través de la cual tiene lugar la evaporación (Strumillo y Kudra, 1986).

N_v es la velocidad con la que el contenido de humedad abandona el sólido; por lo tanto, la expresión obtenida a partir de datos experimentales, que equivalen al flujo de masa por unidad de área descrita por la expresión de Fick de la ecuación (3.2). Donde su gráfica correspondiente es:

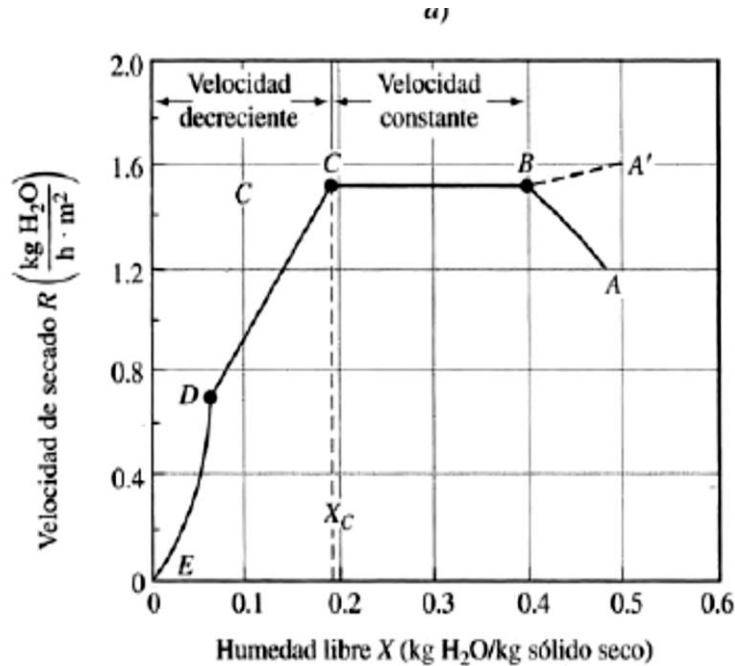


Figura 3.2. N_v vs X

Donde el tramo AB es cuando el sólido está frío y no presenta pérdida inicial por un determinado tiempo de secado. El tramo $A'B$ es cuando el sólido está caliente y presenta pérdidas desde el inicio del tiempo de secado. El tramo BC es un tramo recto, pendiente constante, es cuando la velocidad de pérdida de masa es constante. El tramo CD generalmente es lineal y sucede cuando la velocidad de secado decrece. Se denomina el primer período de velocidad decreciente. El tramo DE es cuando la velocidad de secado disminuye con mas rapidez. Se denomina el segundo período de velocidad decreciente. En algunos casos, el tramo CD no está claramente definido y constituye la totalidad del período de velocidad decreciente.

La humedad crítica o punto crítico (X_c) viene a ser dado por el punto más alto de la gráfica de velocidad de secado que es el punto C , que es donde a partir de ahí la velocidad de secado es constante (tramo CB) hasta disminuir al punto A o ascender al punto A' .

Algunas veces la curva de rapidez de secado se grafica con la ordenada expresada como masa de humedad evaporada (masa del sólido seco) / t (tiempo) que se denota:

$$-\frac{dx}{dt} \quad (3.3)$$

3.8. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECADO

El contenido característico de humedad (ϕ), describe el grado de humedad de un cuerpo en relación al contenido de humedad, que toma en el punto crítico.

Para un sólido higroscópico, ϕ está definido por:

$$\phi = \frac{X - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} \quad (3.4)$$

donde X es el contenido de humedad en el cuerpo, X_c es el valor correspondiente al punto crítico o humedad crítica y X_{eq} es el contenido de humedad en equilibrio.

La velocidad relativa de secado, toma en cuenta las propiedades termo físicas del material. Permite estimar empíricamente la resistencia interna al transporte de humedad ofrecida por el material en el período decreciente.

Si N es la velocidad de secado por unidad de superficie en cualquier momento del proceso y N_w la máxima velocidad obtenida experimentalmente, la velocidad relativa viene dada por:

$$f = \frac{N}{N_w} \quad (3.5)$$

Graficando f vs ϕ a las diferentes temperaturas usadas se obtiene un grupo de curvas cuyo comportamiento si es común, describe una curva característica a la que se puede encontrar una función de ajuste.

Así, cuando la superficie del cuerpo se encuentra saturada $f=1$, tomando valores inferiores al decrecer la velocidad de secado. Considerando que $f=f(\phi)$, se pueden establecer los límites para la velocidad relativa f , de la siguiente manera:

$$f = 1 \text{ Si } X > X_c \quad (3.6)$$

$$f = f(\phi) \text{ Si } X < X_c \quad (3.7)$$

Cuando se ha establecido la curva característica de un material particular, a un conjunto dado de condiciones, es posible estimar velocidades de secado, entre los niveles de humedad especificados para cualquier conjunto de condiciones de proceso, solamente si la resistencia relativa para el movimiento de la humedad a través del aire y del solido se mantienen sin cambiar en las nuevas condiciones, comparadas a aquellas a las cuales fue derivada la curva de secado.

3.9. FUNDAMENTOS DE LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Con el propósito de introducir el análisis del consumo energético en el proceso de secado, además de definir los conceptos básicos del secado directamente involucrados en este trabajo, es necesario establecer en contexto los conceptos termodinámicos básicos que definen la utilización de la energía en el proceso de secado.

La primera ley de la termodinámica es la ley de conservación de energía, que establece que, aunque la energía puede cambiar de forma, no puede crearse ni destruirse. La primera ley define la energía interna como una función de estado y provee una declaración formal de la conservación de la energía (Dincer y Rosen, 2007).

Históricamente, el trabajo era medido en unidades mecánicas de fuerza por distancia, como libras/pie o joules, y el calor era medido en unidades térmicas, como la unidad térmica británica o la caloría. Mediciones de trabajo y calor fueron hechas durante el ciclo de una gran variedad de sistemas y por varias cantidades de trabajo y calor. Cuando los valores de trabajo y energía eran comparados, se encontró que siempre eran proporcionales. Tales observaciones condujeron a la formulación de la ecuación de la primera ley de la termodinámica (Borgnakke y Sonntag, 2009).

3.10. CONCEPTO DE ENERGÍA

La energía es una cantidad escalar que no puede ser observada directamente, pero se puede grabar y evaluar por mediciones indirectas. El valor absoluto de la energía de un sistema es difícil de medir, mientras que el cambio de energía es relativamente fácil de evaluar (Strumillo et al., 2007).

3.11. ENERGÍA Y LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Para una masa de control, las interacciones de energía para un sistema puede ser dividido en dos partes: δQ , la cantidad de calor, y δW , la cantidad de trabajo. A diferencia del cambio en la energía interna total δE , las cantidades δQ y δW no son independientes de la manera de transformación, entonces no podemos especificar δQ y δW simplemente sabiendo los estados iniciales y finales. Por lo tanto, no es posible definir una función Q que depende de los estados iniciales y finales, es decir que el calor no es una función de estado (Dincer y Rosen, 2007).

El análisis de la primera ley de la termodinámica esta descrito de manera similar por (Borgnakke y Sonntag, 2009), (Dincer y Rosen, 2007) y (Smith et al., 2005).

La primera ley de la termodinámica para una masa de control se escribe así:

$$\delta Q = \delta E + \delta W \quad (3.8)$$

donde Q es el calor, W es el trabajo, E representa la energía acumulable y el término d denota la variación diferencial de la función de trayectoria.

Cuando la ecuación de arriba es integrada desde un estado inicial 1 a un estado final 2 resulta:

$$Q_{1-2} = E_2 - E_1 + W_{1-2} \text{ O } E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2} \quad (3.9)$$

Cuando E_1 y E_2 denotan los valores iniciales y finales de la energía E para una masa de control, Q_{1-2} es el calor transferido a la masa de control durante el proceso desde el estado 1 al estado 2, y W_{1-2} es el trabajo realizado por la masa de control durante el proceso del estado 1 al estado 2.

La energía E puede incluir todas las formas de energía acumulable, como la energía interna U, energía cinética KE y la energía potencial PE en términos a lo siguiente:

$$E = U + KE + PE \quad (3.10)$$

Para un cambio de estado del estado 1 al estado 2 con una aceleración constante gravitacional g, la ecuación de arriba se convierte en:

$$E_2 - E_1 = U_2 - U_1 + \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{mg(z_2 - z_1)} \quad (3.11)$$

donde m denota la cantidad fija de masa contenida en el sistema, V la velocidad y Z la elevación.

Las cantidades δQ y δW pueden ser especificadas en términos de las leyes de velocidad para la transferencia de calor y el trabajo. Para un volumen de control, un término adicional aparece del fluido que fluye a través de la superficie de control (entrando en el estado i y saliendo en el estado o). La primera ley de la termodinámica para un volumen de control es:

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{E}_{cv} + \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_o \hat{h}_o - \sum \dot{m}_i \hat{h}_i \quad (3.12)$$

$$\dot{E}_{cv} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i \hat{h}_i - \sum \dot{m}_o \hat{h}_o \quad (3.13)$$

donde en un sistema térmico a presión constante: $\dot{Q}_{cv} = \Delta \dot{H}$, donde \dot{m} es el caudal másico por unidad de tiempo, \hat{h} es la energía total específica, igual a la suma de la entalpía específica, energía cinética e energía potencial, es decir:

$$\hat{h} = h + \frac{v^2}{2} + gZ \quad (3.14)$$

La entalpía total se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$\Delta H = m * Cp * \Delta T \quad (3.15)$$

$$\Delta \dot{H} = \dot{m} * Cp * \Delta T \quad (3.16)$$

3.12. ASPECTOS ECONÓMICOS DE ENERGÍA

Aunque todas las formas de energía son expresadas en las mismas unidades (joules, megajoules, gigajoules etc.), el valor financiero de la energía varía enormemente con su grado o calidad. Usualmente, la energía eléctrica y mecánica son las más costosas, seguidas por energía térmica de alta calidades. Económicamente se sugiere que uno debería de evitar usar energía a un grado significativamente mayor de lo necesario para su propósito. En la industria, tareas usualmente requieren energía, pero a diferentes grados. La oportunidad existe en usar el calor de desecho de un proceso para servir las necesidades de otro en una manera eficiente y efectiva (Dincer y Rosen, 2007).

3.13. GESTIÓN DE LA ENERGÍA

Gestión de la energía, se refiere al proceso de usar la energía cuidadosamente para así ahorrarse dinero o para alcanzar otros objetivos. Las medidas de la gestión de la energía pueden ser divididas en las siguientes categorías: mantenimiento y bajo costo (o simple). La gestión de la energía es mejor ser vista de una manera abierta que permita explorar ejercicios ineficientes, mejorar la conciencia de parte del personal administrativo, operadores o mantenimiento de la industria, combinado con imaginación y/o asistencia de un experto, puede arrojar grandes dividendos en términos del uso de energía y reducciones de costo (Strumillo et al., 2007).

3.14. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Aunque un proceso espontáneo solo puede proceder en una dirección finita, la primera ley de la termodinámica no da información acerca la dirección. La primera ley de la termodinámica es inadecuado para explicar procesos de energía. La segunda ley de la termodinámica establece la diferencia en la calidad de diferentes formas de energía y explica porque algunos procesos pueden ocurrir espontáneamente mientras otros no pueden. También define cantidad de entropía fundamental como un estado de energía aleatorizado no disponible para su conversión directa a trabajo. Además establece que todo proceso espontaneo físico y químico, proceden a maximizar entropía para convertirse más aleatorizado y para convertir energía a una forma menos disponible (Dincer y Rosen, 2007).

La segunda ley reconoce que los procesos proceden en una cierta dirección pero no en la dirección opuesta. Una taza caliente de café se enfría por virtud de transferencia de calor a los alrededores, pero el calor no va a fluir de los alrededores fríos hacia la taza más caliente de café. La gasolina es usada mientras un carro sube una colina, pero la gasolina del tanque no puede ser restaurado a su nivel original cuando el carro baja de la colina. Tales

observaciones familiares son evidencia de la validez de la segunda ley de la termodinámica (Borgnakke y Sonntag, 2009).

3.15. ENTROPÍA

La propiedad Entropía, es una medida de la cantidad de desorden molecular dentro de un sistema. Los valores de entropía específica están comúnmente enlistados en tablas termodinámicas en conjunto con otras propiedades (volumen específico, energía interna específica, entalpía específica). La entropía es una propiedad fundamental relacionada con la primera ley de la termodinámica y tiene las siguientes características: la entropía de un sistema es una medida de su desorden molecular interna, un sistema solo puede generar entropía, no destruirla y la entropía de un sistema puede ser aumentado o disminuido por energías transportadas a través de la frontera del sistema (Dincer y Rosen, 2007).

La ecuación de entropía total es:

$$\Delta S = m * Cp * \ln \frac{T_o}{T_i} \quad (3.17)$$

$$\Delta \dot{S} = \dot{m} * Cp * \ln \frac{T_o}{T_i} \quad (3.18)$$

3.16. EXERGÍA

La exergía de un sistema es definida como el trabajo de eje máxima que se puede hacer por el material compuesto del sistema y un entorno de referencia especificado. El entorno de referencia es asumido de ser infinito, en equilibrio, y encierra todos los otros sistemas. Usualmente, el entorno es especificado declarando su temperatura, presión y composición química. Exergía no es simple una propiedad termodinámica sino que es una propiedad del sistema y de la referencia de entorno. También tiene la característica en que es solo conservada cuando todos los procesos ocurriendo en un sistema y el entorno son reversibles. Es destruida cuando un proceso irreversible ocurre. El análisis exergético toma en consideración los diferentes valores termodinámicos de diferentes formas y cantidades de energía como el calor y el trabajo (Dincer y Rosen, 2007).

La ecuación para calcular exergía es la siguiente:

$$Ex = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (3.19)$$

3.17. EFICIENCIA POR SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La eficiencia exergética es una eficiencia basada en la segunda ley de la termodinámica. Ingenieros utilizan frecuentemente las eficiencias para medir el rendimiento de procesos o dispositivos (De Oliveira, 2012).

Para ilustrar la idea de un parámetro de rendimiento basado en la segunda ley de la termodinámica y para contrastarlo con una eficiencia basada en energía análoga, considere un volumen de control en estado estacionario en cual los balances de energía y exergía pueden ser escritos respectivamente como:

$$(Energia\ entrante) = (Energia\ salida\ en\ producto) + (Energia\ emitida\ con\ desperdicio) \quad (3.20)$$

$$(Exergia\ entrante) = (Exergia\ salida\ en\ producto) + (Exergia\ emitida\ con\ desperdicio) + (Exergia\ destruido) \quad (3.21)$$

En estas ecuaciones, el termino producto puede referirse a trabajo en un eje, electricidad, cierta transferencia de calor o una combinación de estos. Los dos últimos términos en la ecuación de balance de exergía, se combinan para constituir las pérdidas de exergía. Las perdidas incluyen las emisiones a los alrededores como calor desperdiciado y gases. La destrucción de exergía es causado por irreversibilidades internas.

En vista de energía o exergía, un indicador de como efectivamente la entrada es convertido en el producto es la proporción de producto a entrada. Así, la eficiencia energética η puede ser escrito como:

$$\eta = \frac{Energia\ salida\ en\ producto}{Energia\ de\ entrada} = 1 - \frac{Energia\ perdida}{Energia\ de\ entrada} \quad (3.22)$$

Y la eficiencia exergética ψ como:

$$\psi = \frac{Exergia\ salida\ en\ producto}{Exergia\ de\ entrada} = 1 - \frac{Exergia\ perdida}{Exergia\ de\ entrada} = 1 - \frac{Emision\ de\ exergia\ de\ desperdicio + Exergia\ destruida}{Exergia\ de\ entrada} \quad (3.23)$$

$$\psi = \frac{Flujo\ de\ agua\ evaporada\ del\ sólido * (exergia\ de\ la\ evaporación - exergia\ de\ la\ evaporación\ inicial)}{Flujo\ de\ aire\ entrante * exergia\ del\ aire\ inicial} \quad (3.24)$$

La definición de la ecuación 3.23, en términos de la información disponible es:

$$\psi = \frac{\dot{m}_{ag\ ev} * (Ex_{ev} - Ex_{ev0})}{\dot{m}_{ai} * Ex_{ai}} \quad (3.25)$$

$$\text{Con: } Ex = \dot{m} * ex \quad (3.26)$$

donde ex es la exergía específica.

La eficiencia exergética ψ da una mejor comprensión en rendimiento que la eficiencia energética η (Dincer y Rosen, 2007).

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla las herramientas, materiales y procedimientos para llevar a cabo los experimentos, procesamiento de datos y cálculos con base a esos datos procesados mediante el uso de los modelos y ecuaciones presentadas en el marco teórico. Para llevar a cabo las pruebas necesarias que satisfacen este trabajo, se hizo uso de un equipo con un sistema de control integrado de velocidad del aire y temperatura del aire el cual nos permitirá monitorear y ajustar las variables a controlar. La cantidad de experimentos está regida por un diseño experimental empleando modelos estadísticos.

4.1. MATERIAL

Los materiales alimenticios a usar además de poseer sus características físicas individuales, también poseen su propia composición química y su respectivo contenido de agua, la cual será removida, utilizando un secador de túnel convectivo acoplado con sílice gel en una torre para secar el aire entrante al sistema.

4.1.1. TOMATE

El tomate ocupado fue el conocido en Nicaragua como el tomate criollo, de madurez constante y comprado diario en el supermercado. La muestra se lavó con agua en su superficie después fue cortada en el volumen del porta muestra calculando su peso inicial con la balanza asegurando que la cantidad cortada siempre fuera la misma.

4.1.2. PIÑA

La piña ocupada fue la conocida en Nicaragua como piña criolla, de madurez constante y comprado diario en el supermercado. La muestra se lavó con agua en su superficie después fue cortada en el volumen del porta muestra calculando su peso inicial con la balanza asegurando que la cantidad cortada siempre fuera la misma.

4.2. TRABAJO EXPERIMENTAL

Para realizar el presente estudio se partió del trabajo experimental para obtener los datos necesarios que permiten el análisis del comportamiento del secado y el cálculo de exergía.

A continuación se detallara las características del equipo, los pasos del experimento y el diseño experimental del mismo.

4.2.1. EQUIPO

El equipo utilizado es un secador de túnel convectivo el cual se muestra a modo de esquema en la figura 4.1, con sus componentes, los cuales permiten controlar las condiciones experimentales y la recolección de datos.

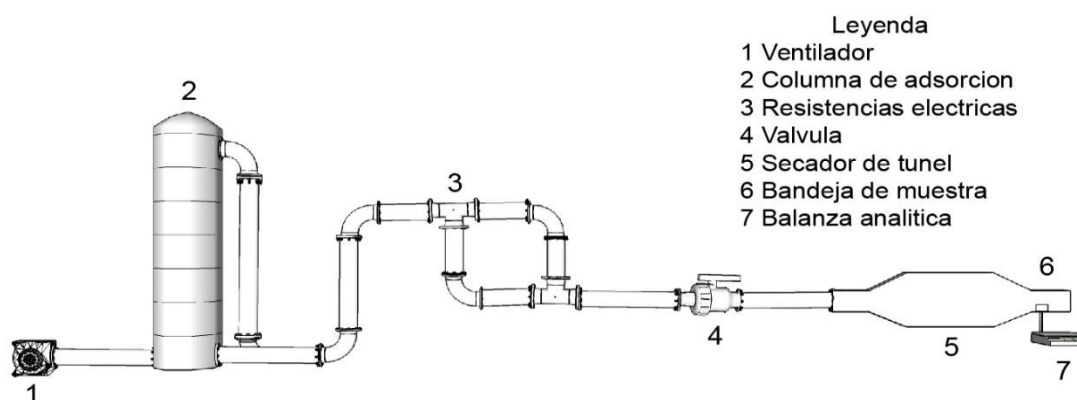


Figura 4.1. Esquema del secador de túnel

El secador funciona inicialmente tomando aire a través del ventilador (1) dirigiéndolo a través de tuberías hacia la columna (2) la cual contiene sílica gel como agente adsorbente, el aire previamente seco en este punto pasa a ser calentado por un grupo de resistencias eléctricas (3), las cuales se encuentran conectadas a un controlador de temperatura automático que mantiene constante la temperatura establecida. Las muestras de cada vegetal serán ubicadas en un porta muestra de teflón.

Al alcanzar la temperatura requerida, el porta muestra se colocará sobre la balanza analítica (7), la balanza permite observar el cambio de peso de la muestra en el tiempo y esta se encuentra conectada a una computadora donde se registraran los cambios de peso de la muestra.

Previo a cada experimento se debe regenerar la sílica gel contenida en la columna. Esto se realiza llevando el aire a las resistencias y luego hacia la columna, así el aire caliente removerá la humedad contenida en la sílica, este proceso finaliza hasta que el aire lanzado a la atmosfera contiene una humedad relativa baja, la cual será verificada con un medidor de humedad portátil TESTO® colocándolo a la salida del flujo de aire.

4.2.2. EXPERIMENTO

Para cada una de las corridas experimentales se preparó la muestra, cortando cada vegetal en trozos de modo que ocupara todo el volumen del porta muestra el cual es 16.87 cm^3 midiendo su peso inicial con la balanza asegurando que el peso fuera el mismo. El porta muestra (Figura 4.2) se colocó luego sobre la balanza en la sección del secador de túnel (Figura 4.1.), de modo que el porta muestra estuviera expuesto a las condiciones requeridas por el experimento las cuales se definieron por las variables controlables: temperatura y velocidad de la corriente del aire.

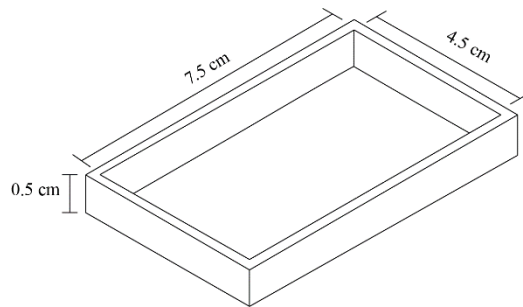


Figura 4.2. Porta muestras

Se considera que el área de secado es el mismo del porta muestra porque el área es pequeño, aunque durante el secado, el área se disminuye porque mientras se va secando el material, este se reduce en volumen.

4.2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño estadístico de experimentos es la forma más eficaz de hacer pruebas. Consiste en determinar cuáles pruebas deben realizarse y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas (Díaz, 2009).

Pulido y de la Vara Salazar (2012), recomiendan que antes de escoger y realizar un diseño experimental, tenemos que aplicar las siguientes etapas:

1. Entender y delimitar el problema u objeto de estudio: Esto se hace con investigaciones preliminares de tal forma que quede claro que se va a estudiar, porque es importante y si es un problema, cual es la magnitud del mismo.

2. Elegir la(s) variable(s) de respuesta que será medida en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable: Esta elección es vital ya que refleja el resultado de las pruebas. Se debe de tener confianza en las mediciones y garantizar que los instrumentos y/o métodos sean capaces de repetir y reproducir una medición que tienen la precisión (error) y exactitud (calibración) necesaria.
3. Determinar cuáles factores deben estudiarse o investigarse, de acuerdo a la supuesta influencia que tienen sobre la respuesta: Determinar mediante experimentos preliminares o la información disponible para incluir aquellos factores que se considera que tienen un mayor efecto.
4. Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento: Este paso implica determinar cuántas repeticiones se harán para cada tratamiento, tomando en cuenta el tiempo, el costo y la precisión deseada.
5. Planear y organizar el trabajo experimental: Con base en el diseño seleccionado, organizar y planear con detalle el trabajo experimental.
6. Realizar el experimento: Seguir al pie de la letra el plan previsto en la etapa anterior, y en caso de algún imprevisto, determinar a qué persona se le reportaría.

En la página siguiente en la tabla 4.1 se ilustran las definiciones básicas del diseño experimental del experimento.

Tabla 4.1. Definiciones básicas del diseño experimental en este experimento.

Experimento	Unidad experimental	Variable de respuesta	Factores controlables	Factores no controlables o de ruido	Factores estudiados
Se varían las condiciones de temperatura y velocidad del aire para determinar la combinación óptima del balance energético para tomate y piña.	Trozos de tomate.	Velocidad de secado.	Temperatura.	Humedad.	Temperatura.
	Trozos de piña.			Consistencia del vegetal.	
			Velocidad del aire.	Variedad de vegetal.	Velocidad del aire.

4.2.4. SELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Existen muchos diseños experimentales para estudiar la gran diversidad de problemas o situaciones que ocurren en la práctica. Es preciso conocer cómo es que se clasifican los diseños de acuerdo con su objetivo y su alcance.

Los cinco aspectos que más influyen según (Pulido y de la Vara Salazar, 2012) en la selección de un diseño experimental, en el sentido de que cuando cambian por lo general nos llevan a cambiar de diseño, son:

1. El objetivo del experimento
2. El número de factores a estudiar
3. El número de niveles que se prueban en cada factor
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta)
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada

En la figura 4.3 que se muestra la clasificación de los diseños experimentales de acuerdo a su objetivo y se listan los diseños particulares más representativos de cada rama.

De acuerdo a esta clasificación por objetivo, el objetivo de este experimento es: estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta. Donde aparecen listados tres diseños que son los más representativos de esa rama que son:

1. Diseños factoriales 2^k
2. Diseños factoriales 3^k
3. Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p}

Comparando el desglose de este experimento con esos tres diseños experimentales, rápidamente podemos ver que tenemos dos factores estudiados y tres niveles de cada factor. Así eliminando el diseño factorial 2^k y el diseño factorial fraccionado 2^{k-p} que se utilizan para k factores y dos niveles de cada factor.

Adentrándonos en los diseños factoriales 3^k , se encuentran los siguientes tipos:

1. El 3^2 : La más básica del diseño factorial 3^k , que posee un diseño de dos factores estudiados y tres niveles de cada uno.
2. El 3^3 : Donde se utiliza un diseño de tres factores estudiados con tres niveles de cada uno.
3. Diseño general 3^k : Diseño que se utiliza cuando el k es mayor que tres (cuatro o más factores en el diseño).
4. Replica fraccionada 3^k : Diseño utilizado debido a que una réplica completa del diseño 3^k puede requerir un número bastante grande de corridas para valores moderados de k (literatura recomienda para diseños mayores a 3^3). El diseño más común es la fracción un tercio del diseño factorial 3^k .
5. Replica fraccionada 3^{k-p} : Diseño utilizado debido a que una réplica completa del diseño 3^k puede requerir un número bastante grande de corridas para valores moderados de k .

(literatura recomienda para diseños mayores a 3^3). El diseño más común es la fracción mixta porque los niveles de nuestros factores son el mismo (dos factores con tres niveles), (Díaz, 2009).

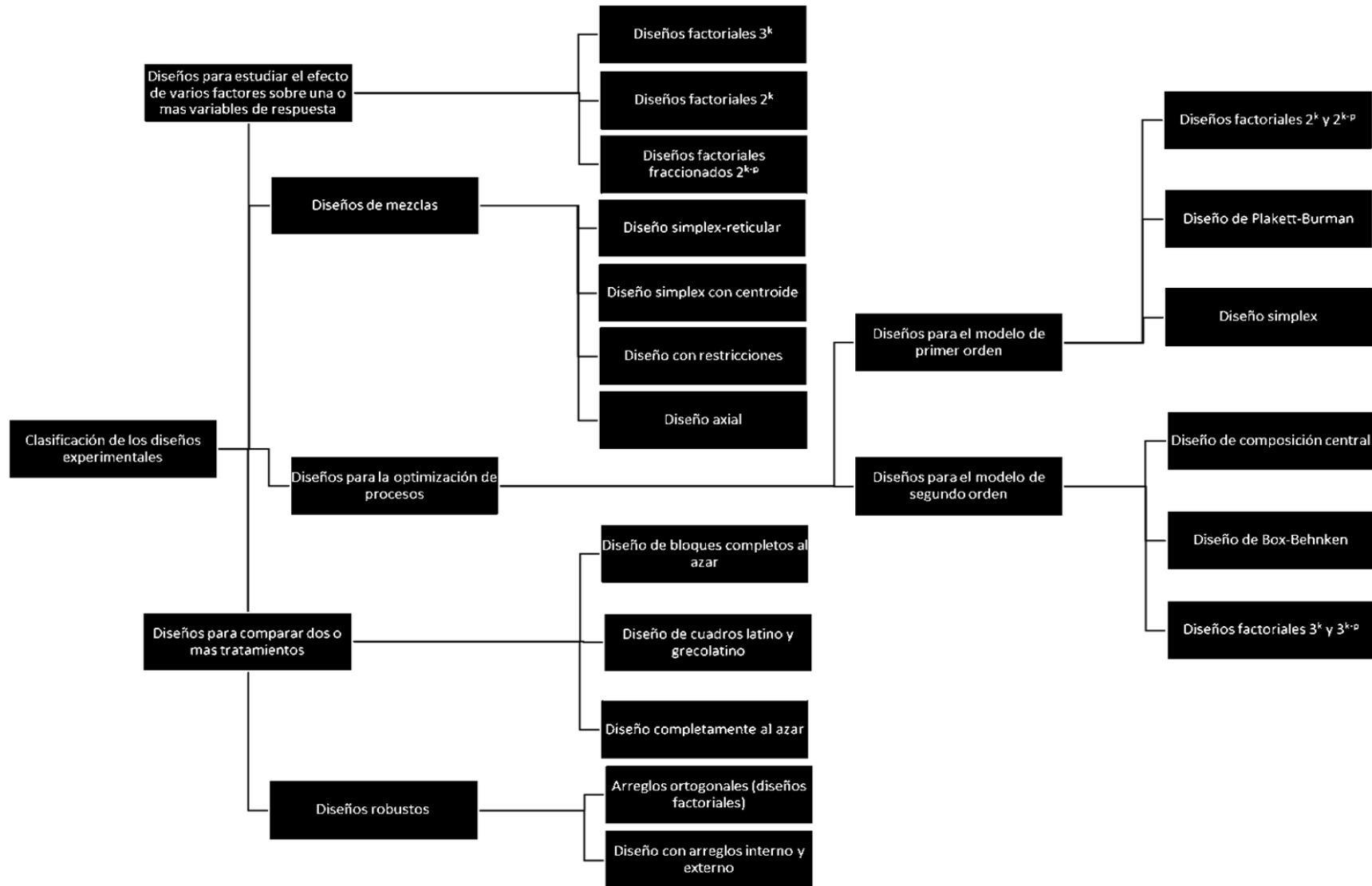


Figura 4.3. Clasificación de los diseños experimentales (Pulido y de la Vara Salazar, 2012)

4.2.5. DISEÑO DE LA MATRIZ EXPERIMENTAL 3²

El diseño de la matriz experimental se inició con la selección de los valores de los niveles para nuestros dos factores, que son la temperatura y la velocidad del aire. Se muestran en las tablas 4.2 y 4.3 los valores escogidos.

Tabla 4.2 Niveles de temperatura por vegetal

Niveles de temperatura		
Vegetal	Nivel de temperatura	Valor matemático
Tomate	Bajo (-1)	100°C
	Intermedio (0)	115°C
	Alto (+1)	130°C
Piña	Bajo (-1)	100°C
	Intermedio (0)	115°C
	Alto (+1)	130°C

Tabla 4.3 Nivel de velocidad del aire por vegetal

Niveles de velocidad del aire		
Vegetal	Nivel de velocidad del aire	Valor matemático
Tomate	Bajo (-1)	0.55 m/s a 1800 rpm del ventilador
	Intermedio (0)	0.73 m/s a 2400 rpm del ventilador
	Alto (+1)	0.94 m/s a 3000 rpm del ventilador
Piña	Bajo (-1)	0.55 m/s a 1800 rpm del ventilador
	Intermedio (0)	0.73 m/s a 2400 rpm del ventilador
	Alto (+1)	0.94 m/s a 3000 rpm del ventilador

Se procedió a estructurar la matriz experimental con el número total de experimentos (tratamientos) obtenidos de la interacción de los factores con sus niveles y se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Matriz de diseño de los tratamientos totales del experimento

Nivel de temperatura	Nivel de velocidad del aire	Tratamiento
-1	-1	1
0	-1	2
+1	-1	3
-1	0	4
0	0	5
+1	0	6
-1	+1	7
0	+1	8
+1	+1	9

En la matriz anterior se aplicó el método de los extremos y medios (Montgomery, 2005) donde se manifiesta que haciendo los experimentos de los extremos y la zona central se pueden determinar los demás experimentos así reduciendo el número total de experimentos en un diseño experimental. En la tabla 4.5 se muestra los experimentos seleccionados y en la tabla 4.6 como quedaría la matriz final experimental.

Tabla 4.5 Matriz de diseño experimental con el total de combinaciones posibles de las dos variables y sus respectivos niveles.

Nivel de temperatura	Nivel de velocidad del aire	Tratamiento
-1	-1	1
0	-1	2
+1	-1	3
-1	0	4
0	0	5
+1	0	6
-1	+1	7
0	+1	8
+1	+1	9

Tabla 4.6 Matriz de diseño experimental con el número total de experimentos determinado por la aplicación del método de los extremos.

Nivel de temperatura	Nivel de velocidad del aire	Tratamiento
-1	-1	1
+1	-1	2
0	0	3
-1	+1	4
+1	+1	5

Tabla 4.7. Matriz de diseño experimental tomando en cuenta 2 réplicas.

Nivel de temperatura	Nivel de velocidad del aire	Tratamiento
-1	-1	1
+1	-1	2
0	0	3
-1	+1	4
+1	+1	5
-1	-1	6
+1	-1	7
0	0	8
-1	+1	9
+1	+1	10
-1	-1	11
+1	-1	12
0	0	13
-1	+1	14
+1	+1	15

Tabla 4.8. Matriz de diseño experimental aleatorizado en el programa STATGRAPHICS.

Nivel de temperatura	Nivel de velocidad del aire	Tratamiento
-1	+1	1
0	0	2
+1	-1	3
-1	-1	4
+1	+1	5
+1	-1	6
0	0	7
-1	+1	8
-1	-1	9
+1	+1	10
+1	-1	11
-1	-1	12
-1	+1	13
0	0	14
+1	+1	15

4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS

Las variables controladas en cada corrida experimental fueron la velocidad del aire y la temperatura del mismo. Estos parámetros permanecieron constantes durante el experimento, aunque variaron de un experimento a otro. Primero se midió la masa inicial de cada muestra de vegetal y su humedad inicial, la humedad relativa del aire a la entrada, a la salida del túnel y la pérdida de peso de la muestra durante el tiempo.

Durante cada corrida experimental, se recopilaron los siguientes datos de interés:

- Tiempo
- El peso de la muestra

Primeramente se tomó una muestra de cada vegetal y se midió la humedad contenida usando una balanza analítica medidora de humedad, este paso se realizó para cada corrida experimental. Luego del paso anterior se procedió a poner en marcha el sistema usado, donde la humedad relativa del aire a la entrada del túnel y a la salida se midió con un medidor de humedad y temperatura TESTO®, el cual permitió tomar los datos de humedad relativa en tiempo real. Con la asistencia

de una cámara de video ubicada frente a la pantalla de la balanza analítica, se grabó en tiempo real la pérdida de masa de la muestra. Después esos datos de pérdida de masa y tiempo son ingresados en una tabla de Excel y a partir de esa tabla de Excel comienza el procesamiento de datos y los cálculos necesarios.

El cálculo de humedad inicial de la muestra fue obtenido utilizando una balanza especializada para esta medición de marca: SARTORIUS modelo MA150, la cual se mantuvo calculando hasta que la muestra no registró un cambio de peso, determinando así el porcentaje de humedad que contiene la muestra.

4.4. PROCESAMIENTO DE DATOS Y CÁLCULOS

A continuación se detallará la manera en que se procesaron los datos y cómo se efectuaron los cálculos, paso a paso.

Los datos adquiridos de los experimentos se procesaron con el software MATLAB mediante un programa mostrado en los apéndices. Este programa inició con la importación de los datos de EXCEL (datos de peso de la muestra vs tiempo). Con esos datos básicos se procedió a calcular la humedad en base seca, X [gramos de agua / gramos de solido seco] mediante la siguiente ecuación:

$$X = \frac{(m - m_s)}{m_s} \quad (4.1)$$

donde m es la masa de la muestra vegetal en un tiempo determinado y m_s es la masa del solido seco de la muestra, la cual se calculó con el contenido de humedad inicial en base húmeda de la muestra, de la siguiente manera:

$$m_s = m_i * (1 - X) \quad (4.2)$$

donde m_i es la masa inicial de la muestra y X es la humedad en base húmeda expresada como fracción porcentual.

Luego la humedad en base seca se normaliza para homogenizar las curvas de manera que el peso inicial de cada muestra en los experimentos no afecte el punto de partida de la curva, así el contenido de humedad, x iniciara siempre en 1. Esto se hace con la siguiente ecuación:

$$X_n = \frac{X(t)}{X(t=0)} \quad (4.3)$$

Siendo $X(t)$ el valor de la humedad en base seca en el tiempo, $X(t=0)$ el primer valor de humedad calculado antes de iniciar el experimento y X_n la humedad en base seca normalizada.

4.4.1. CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO

Para la construcción de la curva de velocidad de secado se requiere encontrar el diferencial de la humedad vs tiempo, utilizando la ecuación 3.2 y 3.3.

Para esto necesitamos graficar los datos de X_n vs tiempo y ajustar esa curva experimental con un modelo empírico polinomial. La función obtenida experimentalmente se derivó numéricamente y el polinomio de ajuste se derivó analíticamente para encontrar el término dx_n/dt que requerido para la ecuación 3.2.

Luego se procedió a construir las curvas de velocidad de secado experimental y ajustadas (N_v vs X_n) para su posterior análisis. Este procedimiento se repitió para cada tratamiento del diseño experimental.

No se tomó en consideración el efecto del encogimiento $A = f(x)$ porque el área de secado es pequeño y no va a afectar en los resultados finales.

4.4.2. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECADO

La curva característica de secado se construyó normalizando las curvas de velocidades de secado de cada tratamiento con las ecuaciones 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7.

Después se realizó una regresión con los datos de las curvas en las gráficas de f vs ϕ y la curva característica de secado se expresó como una función polinomial de un determinado orden $f(\phi)$.

4.4.3. BALANCE DE MASA EN LA CORRIENTE DE AIRE

Se procede a realizar el balance de masa en la corriente de aire para encontrar los datos iniciales y finales necesarios para el cálculo de la entalpía, entropía, exergía y eficiencia exergética, que son el flujo de aire entrante, flujo de aire seco entrante, flujo de agua entrante con el aire, masa y flujo de agua removida del sólido, flujo de agua total saliente y el flujo de aire saliente.

Ecuación de densidad del aire ocupando sus propiedades de aire seco:

$$\rho = \frac{\rho_{as} * (1 + \omega_{ag_i})}{1 + (1.609 * \omega_{ag_i})} \quad (4.4)$$

donde ω_{ag_i} es la humedad absoluta obtenida por psicrometría.

Las medidas de la recámara de secado: 8" de ancho y 4" de altura.

Ecuación de flujo de aire entrante:

$$(\dot{m}_a)_i = \rho * A * V \quad (4.5)$$

Ecuación flujo de aire seco entrante:

$$\dot{m}_{as_i} = \dot{m}_{a_i} - \dot{m}_{ag_i} \quad (4.6)$$

Ecuación de flujo de agua entrante con el aire:

$$\dot{m}_{ag_i} = \frac{\omega_i * \dot{m}_{ag_i}}{(1 + \gamma_i)} \quad (4.7)$$

Ecuación de masa de agua removida del solido:

$$m_{ag_o} = m_{sol_i} - m_{sol_o} \quad (4.8)$$

donde los datos de m_{sol_o} son provenientes de la curva de secado X vs t y m_{sol_i} es constante (valor inicial).

Ecuación de flujo de agua removida del solido:

$$\dot{m}_{ag_o} = \frac{\Delta m_{ag}}{\Delta t} = \frac{m_{ag_{j+1}} - m_{ag_j}}{\Delta t} \quad (4.9)$$

Ecuación de flujo de agua total saliente:

$$\dot{m}_{ag_o} = \dot{m}_{ag_i} + \dot{m}_{ag_o} \quad (4.10)$$

Ecuación de flujo de aire saliente:

$$\dot{m}_{a_o} = \dot{m}_{a_i} + \dot{m}_{ag_o} \quad (4.11)$$

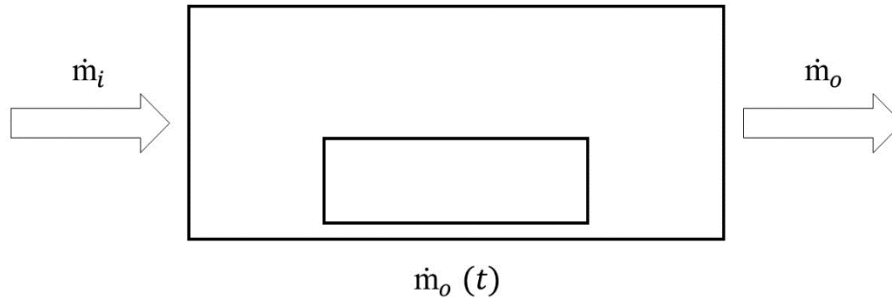


Figura 4.4. Diagrama del equipo con sus entradas y salidas de flujo.

4.4.4. CALCULO DE ENTALPÍA

Entalpía es una magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno. Se procede con los valores anteriores calculados a desarrollar la ecuación de entalpía descritas en las ecuaciones 3.15 y 3.16:

$$\dot{H}_o - \dot{H}_i = \dot{m}_o * Cp * T_o - \dot{m}_i * Cp * T_i \quad (4.12)$$

$$\dot{H}_i = (\dot{m}_{as_i} * Cp_a + \dot{m}_{ag_i} * Cp_{ag})T_i \quad (4.13)$$

$$\dot{H}_o = (\dot{m}_{as_o} * C p_a + \dot{m}_{ag_o} * C p_{ag}) T_o \quad (4.14)$$

donde el Cp del aire a 100 °C es: $C p_a = 1.009 \frac{KJ}{Kg * ^\circ K}$ y el Cp vapor de agua a 100°C es: $C p_{ag} = 1.89 \frac{KJ}{Kg * ^\circ K}$

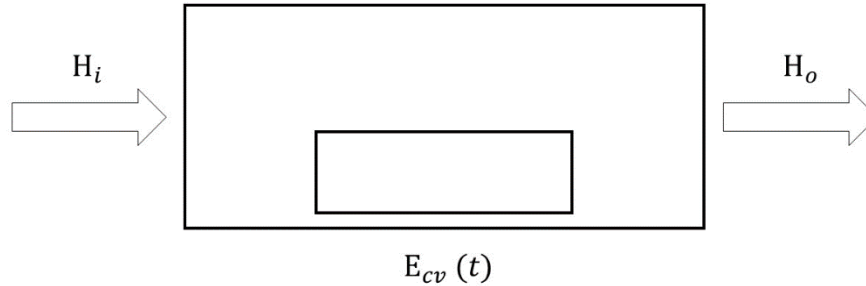


Figura 4.5. Diagrama del equipo con sus entradas y salidas de entalpía.

4.4.5. CALCULO DE ENTROPÍA

La entropía es una magnitud física que para un sistema termodinámico en equilibrio mide el número de micro estados compatibles con el macro estado de equilibrio, también se puede decir que mide el grado de organización del sistema, o que es la razón incremental entre un incremento de energía interna frente a un incremento de temperatura del sistema. Se procede con los valores anteriores calculados a desarrollar la ecuación de entropía descritas en las ecuaciones 3.17 y 3.18:

$$\dot{S}_o - \dot{S}_i = \dot{m}_o * C p * \ln(T_o) - \dot{m}_i * C p * \ln(T_i) \quad (4.15)$$

$$\dot{S}_i = (\dot{m}_{as_i} * C p_a + \dot{m}_{ag_i} * C p_{ag}) \ln T_i \quad (4.16)$$

$$\dot{S}_o = (\dot{m}_{as_o} * C p_a + \dot{m}_{ag_o} * C p_{ag}) \ln T_o \quad (4.17)$$

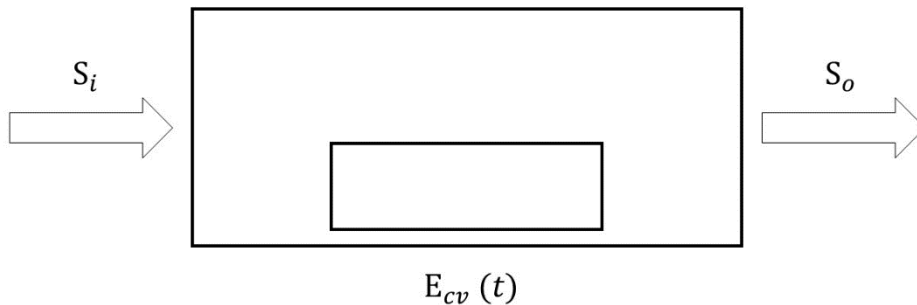


Figura 4.6. Diagrama del equipo con sus entradas y salidas de entropía.

4.4.6. CALCULO DE EXERGÍA

La exergía es una propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno. Informa de la utilidad potencial del sistema como fuente de trabajo. Se procede con los valores anteriores de entalpía y entropía calculadas a desarrollar la ecuación de exergía descrita en la ecuación 3.19:

$$Ex_o - Ex_i = [\dot{H}_o - (T_o * \dot{S}_o)] - [\dot{H}_i - (T_o * \dot{S}_i)] \quad (4.18)$$

$$Ex_i = \dot{H}_i - \dot{H}_o - T_o (\dot{S}_i - \dot{S}_o) \quad (4.19)$$

$$Ex_o = \dot{H}_o - \dot{H}_o - T_o (\dot{S}_o - \dot{S}_o) \quad (4.20)$$

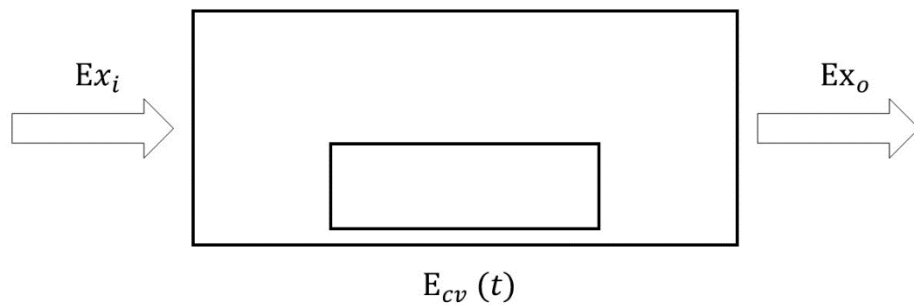


Figura 4.7. Diagrama del equipo con sus entradas y salidas de exergía.

4.4.7. CALCULO DE EFICIENCIA POR SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La eficiencia exergética es una eficiencia basada en la segunda ley de la termodinámica. Ingenieros utilizan frecuentemente las eficiencias para medir el rendimiento de procesos o dispositivos. Con los cálculos de entalpía, entropía y exergía se procede a calcular la eficiencia exergética utilizando la ecuación 3.24.

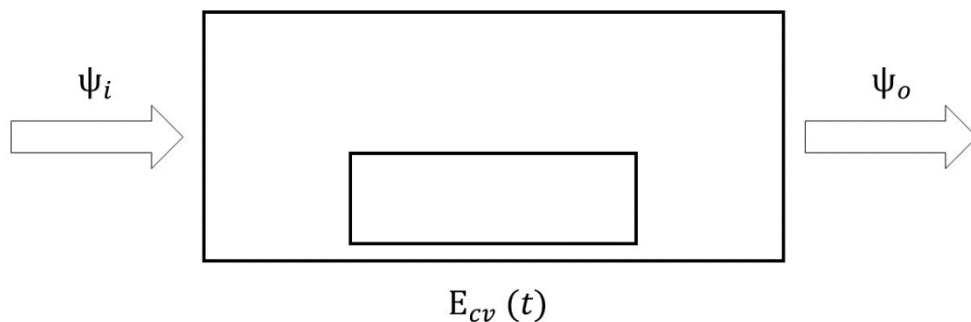


Figura 4.8. Diagrama del equipo con sus entradas y salidas de eficiencia exergética.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de llevar a cabo el análisis por segunda ley (exergía) y el cálculo de las curvas características, se realizaron experimentos en el secador de túnel mencionado en el capítulo 4.2.1. Los datos experimentales obtenidos permitieron desarrollar las curvas de secado y curvas de velocidad de secado, las cuales permitieron desarrollar las curvas características.

El presente estudio de la eficiencia por segunda ley incluye además de su cálculo y análisis, sus curvas características con variaciones de temperatura para obtener una curva generalizada.

5.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y ANÁLISIS DE LA CURVA DE SECADO Y DE VELOCIDAD DE SECADO

Para determinar la influencia de la temperatura, se realizaron los experimentos mencionados en el diseño experimental del capítulo 4.2.3 variando la temperatura con valores fijos de velocidad de aire. Durante cada uno de los experimentos, los valores de masa y tiempo transcurridos fueron registrados como antes descrito en el capítulo 4.3.

El procesamiento de los datos adquiridos de masa variante y el tiempo transcurridos generó las curvas de secado que después generaron las curvas de velocidad de secado de acuerdo a las ecuaciones 3.1 y 3.2.

Las figuras 5.1 al 5.6 muestran las curvas de secado donde se observa claramente el cambio de contenido de humedad en el tiempo. La velocidad con que se retira el contenido de humedad del sólido es visiblemente influenciada por la temperatura siguiendo un patrón similar cualitativa y cuantitativamente.

Con los experimentos realizados a continuación se grafica la curva X vs t :

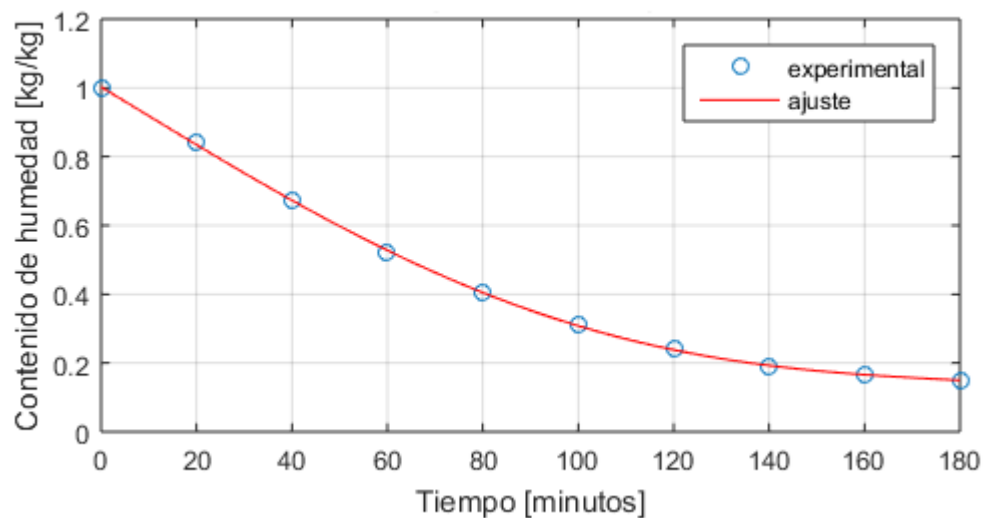


Figura 5.1. Velocidad de secado de la piña a 100°C y 1.45 m/s.

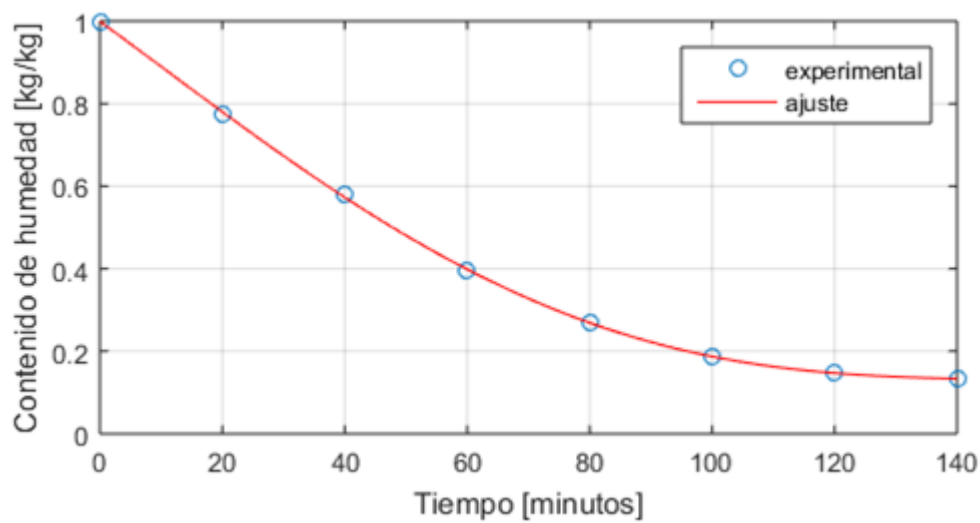


Figura 5.2. Velocidad de secado de la piña a 115°C y 1.45 m/s.

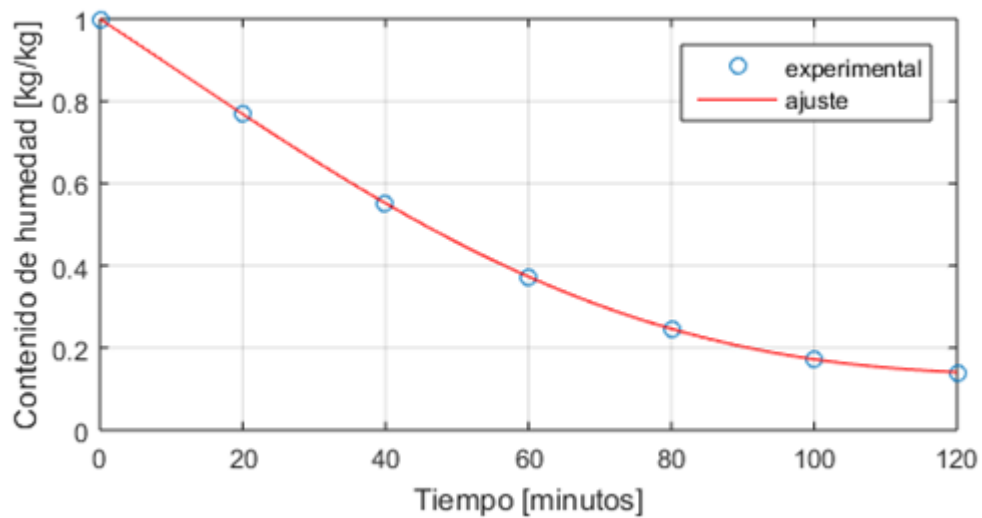


Figura 5.3. Velocidad de secado de la piña a 130°C y 1.45 m/s.

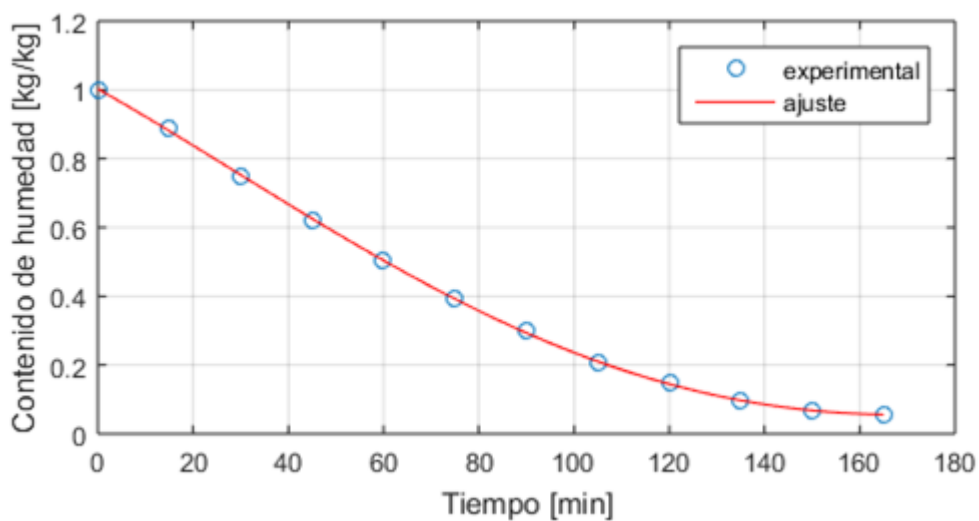


Figura 5.4. Velocidad de secado del tomate a 100°C y 1.45 m/s.

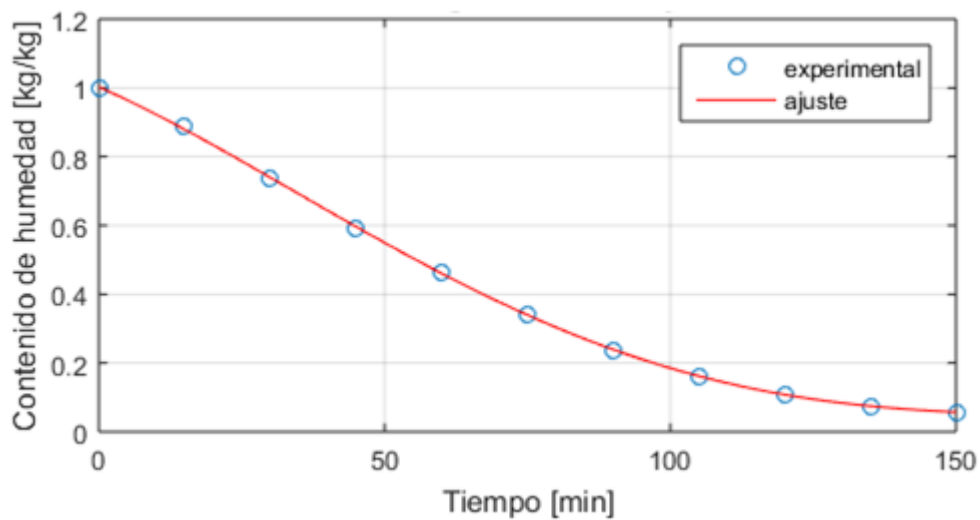


Figura 5.5. Velocidad de secado del tomate a 115°C y 1.45 m/s.

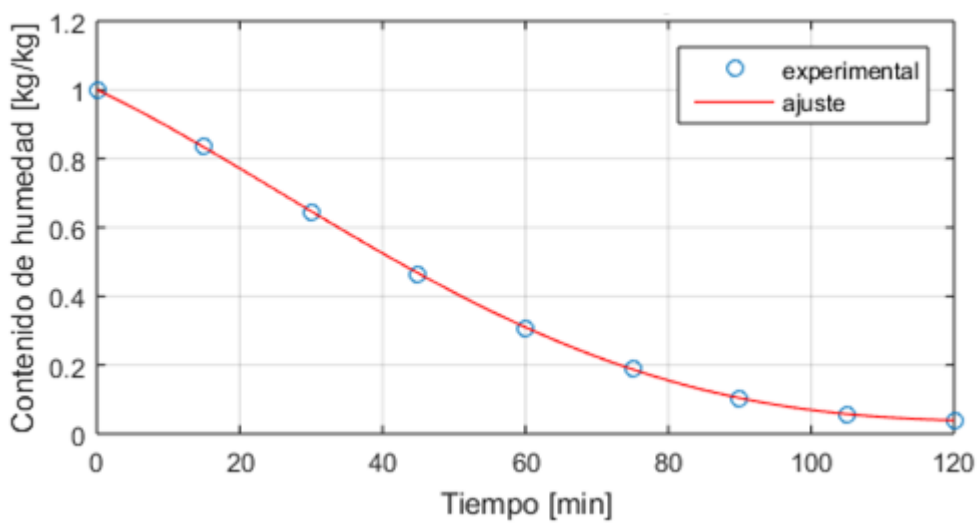


Figura 5.6. Velocidad de secado del tomate a 130°C y 1.45 m/s.

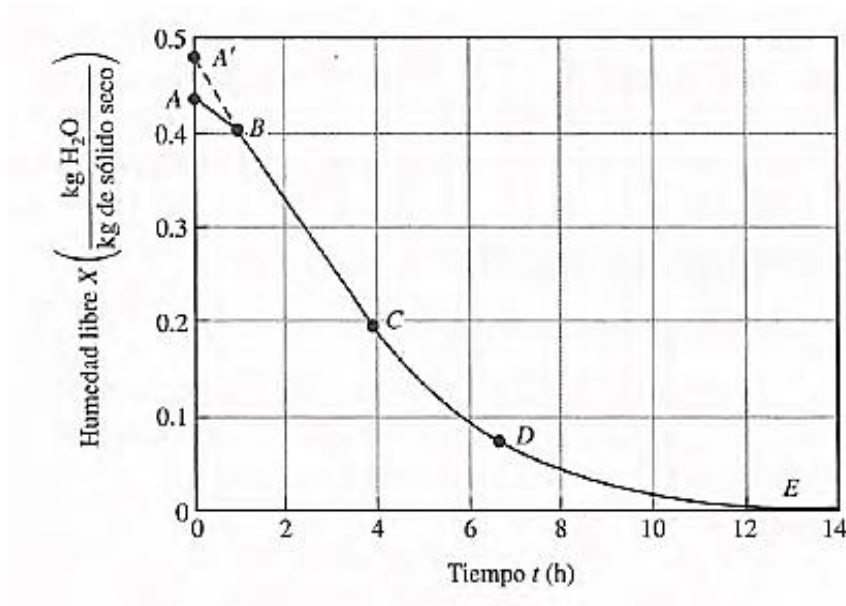


Figura 3.1. X vs t teórico.

Analizando y comparando las gráficas 5.1 al 5.6 con la gráfica 3.1 (Strumillo y Kudra, 1986), vemos que existen tres períodos. Los períodos A B donde el sólido inmediatamente desde su inicio se calienta y comienza a perder humedad, BC corresponde al primer período decreciente lineal del tipo $X = f(t)$ donde la velocidad de secado es constante y el secado se mantiene igual por un período de tiempo hasta que llega a un punto crítico (Punto C) y CD que corresponde al segundo período decreciente donde la línea recta tiende a curvarse hasta formar una asíntota con el contenido de humedad X_{eq} donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado.

Las figuras 5.8 al 5.13 muestran las curvas de velocidad de secado donde la velocidad de secado aumenta con la temperatura. En todas las figuras se exhibe un comportamiento típico con período de secado bien definido donde solo existen períodos de secado ascendente y decreciente.

A como se observan en las gráficas no se alcanza el valor 0 ya que se llega al equilibrio antes de evaporarse por completo el material, esto es debido a las condiciones de secado que se establecieron por las frutas que se ocuparon, porque a altas temperaturas y altas velocidades de secado pierden propiedades y nutrientes importantes, así extendiéndose el tiempo de los experimentos. Con el tiempo extendido de los experimentos, la torre llena de sílice gel se satura por el aire entrante del ventilador que contiene alta humedad por las condiciones naturales del laboratorio y el país de Nicaragua, aumentando la humedad relativa del aire de secado entrante al túnel y cámara de secado. Por lo que probablemente se requiere un tiempo muy prolongado para aproximarse al valor 0.

Teniendo las gráficas X vs t procedemos a graficar la curva de velocidad de secado N_v vs X utilizando MATLAB y el ajuste polinomial:

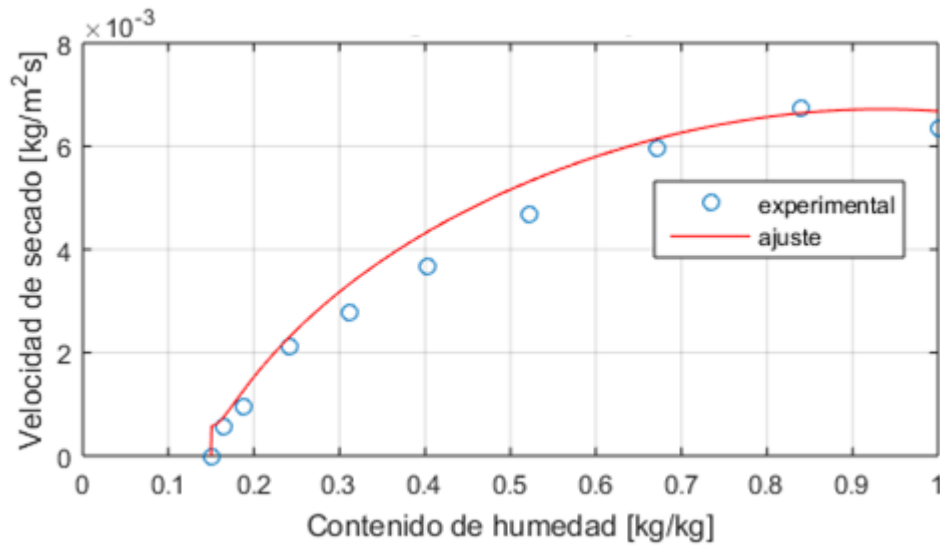


Figura 5.8. N_v vs X de piña a 100°C y 1.45 m/s.

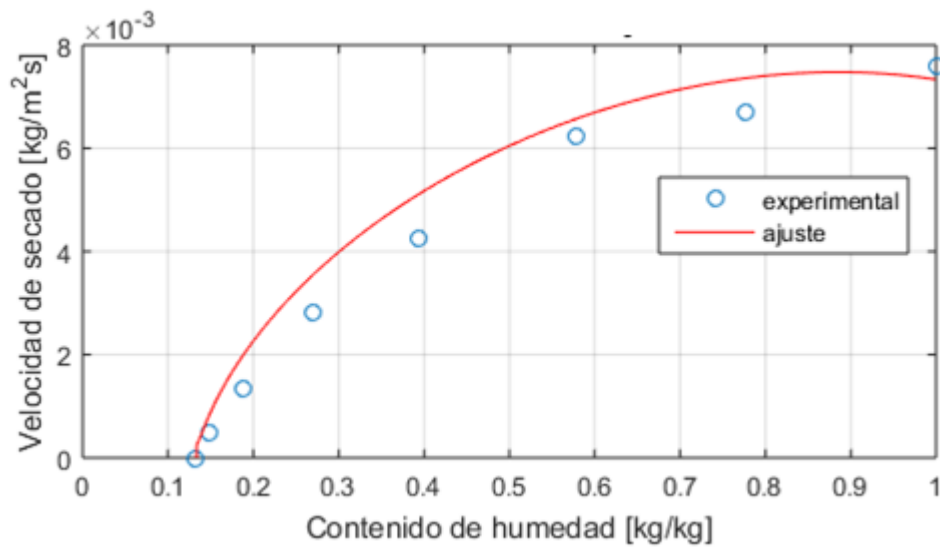


Figura 5.9. N_v vs X de piña a 115°C y 1.45 m/s.

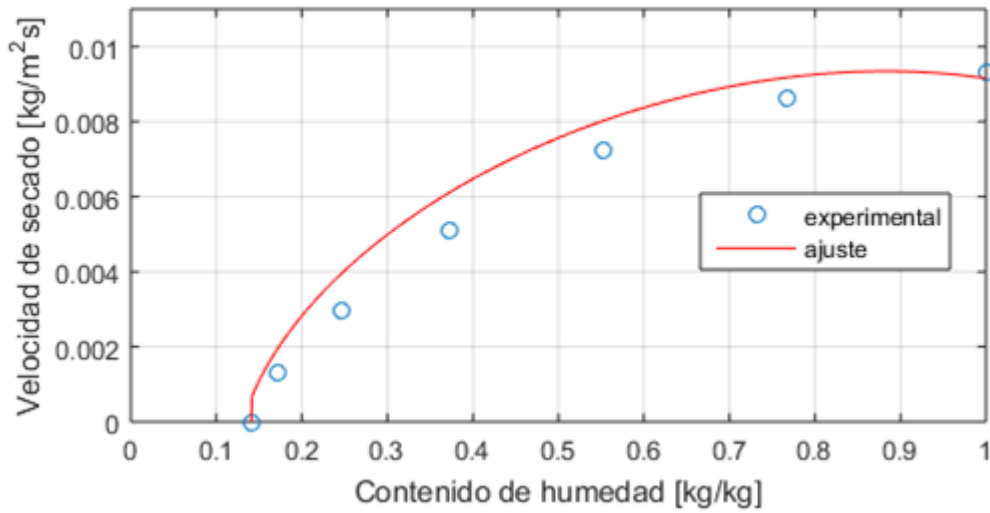


Figura 5.10. N_v vs X de piña a 130°C y 1.45 m/s.

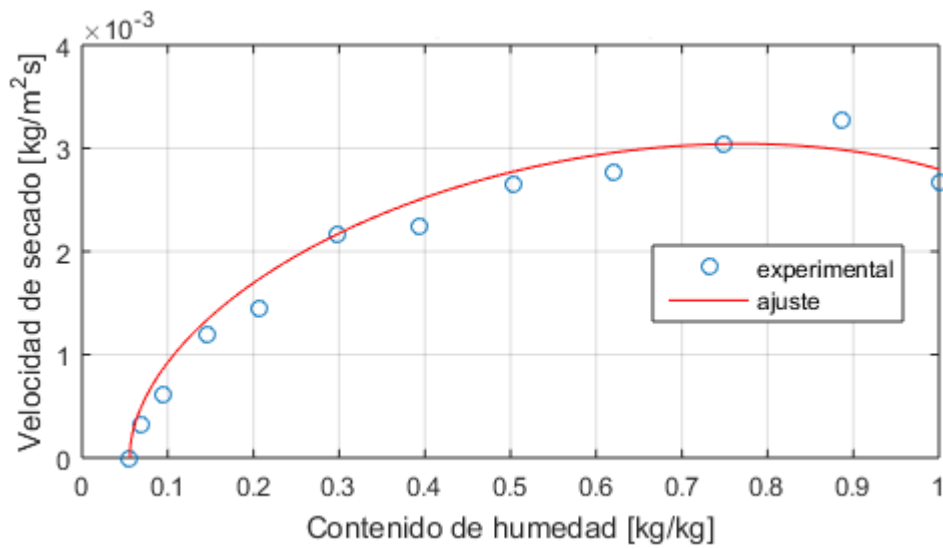


Figura 5.11. N_v vs X de tomate a 100°C y 1.45 m/s.

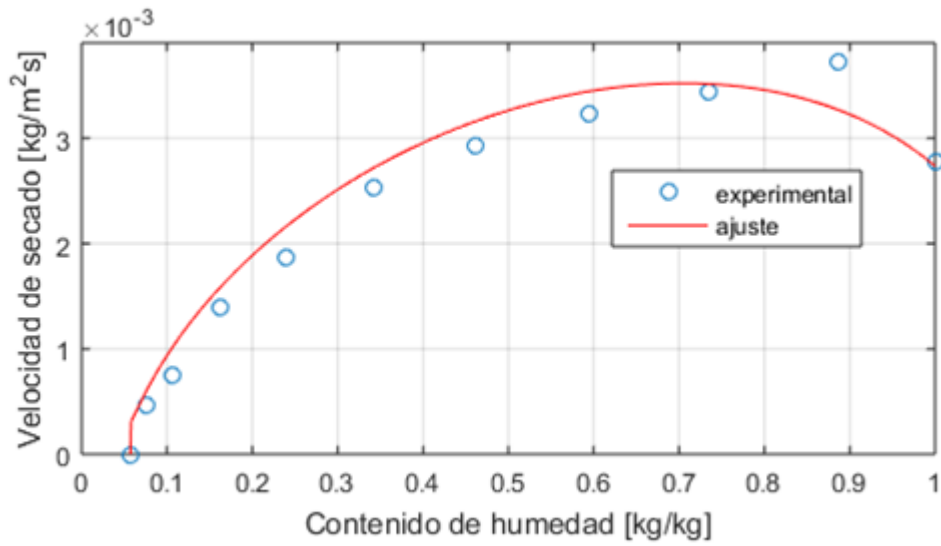


Figura 5.12. N_v vs X de tomate a 115°C y 1.45 m/s.

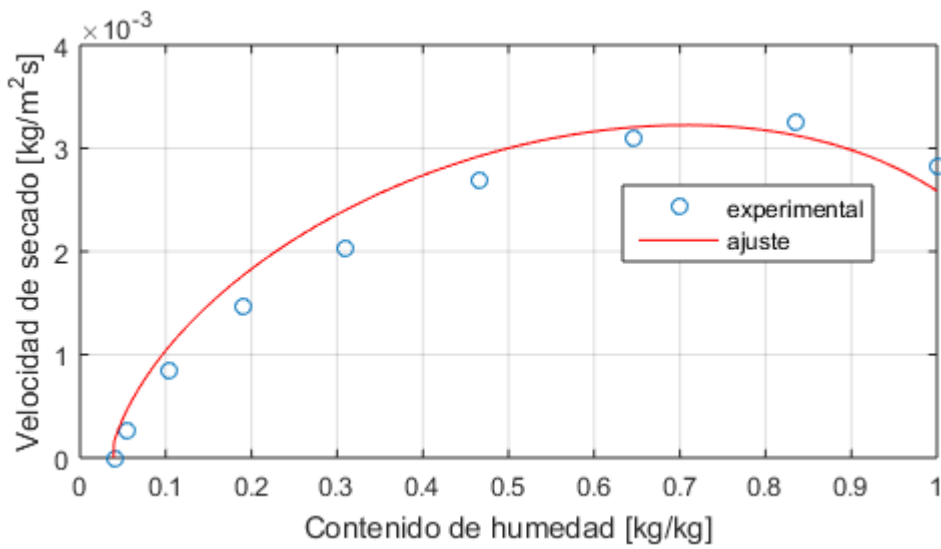


Figura 5.13. N_v vs X de tomate a 130°C y 1.45 m/s.

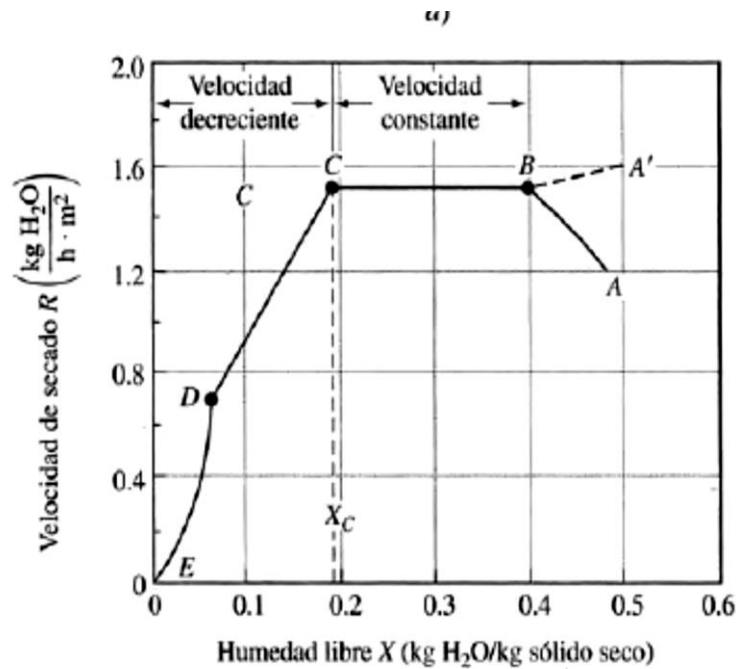


Figura 3.2. N_v vs X teórico.

Comparando las figuras 5.8 al 5.13 a la figura 3.2 (Strumillo y Kudra, 1986), es notorio en el tiempo cero en las gráficas del tomate que la superficie del material está cubierta con una capa delgada de líquido la cual puede ser tratada como humedad libre o capilar.

La evaporación empieza con el contacto con el aire. Como la evaporación de la humedad requiere de la misma cantidad de calor latente de evaporación, la superficie del líquido después de algún tiempo alcanzará una temperatura de equilibrio (período inicial de secado), así la cantidad de calor proveída hacia la superficie desde el aire circulante será igual al calor necesario para el cambio de fase, en cambio en las gráficas de la piña este suceso no ocurre, significando que no contiene la capa delgada de líquido en su superficie.

En ninguna de las gráficas se aprecia el período (curva B-C) donde la velocidad de secado es constante, determinando que la humedad de saturación no es constante y la humedad siempre cambia en cambio cuando $X < X_c$ la cantidad de humedad que alcanza la superficie del cuerpo a secar empieza a caer gradualmente. Como resultado, la velocidad de secado decrece y comienzan los períodos de caída de la velocidad de secado (curva C-D y D-E) donde en estos período la velocidad de secado es controlado por el transporte de la humedad del material (condiciones internas) las cuales dependen del gradiente de la concentración de humedad y por la naturaleza del sólido que se resiste más cuando su humedad decrece. Cabe destacar que los dos períodos decrecientes no se pueden diferenciar entre si sino que son una sola etapa decreciente con un comportamiento no lineal.

A como se observó anteriormente no se alcanza el valor 0 ya que se llega al equilibrio antes de evaporarse por completo el material, esto es debido a las condiciones de secado que se establecieron por las frutas que se ocuparon, porque a altas temperaturas y altas velocidades de secado pierden

propiedades y nutrientes importantes, así extendiéndose el tiempo de los experimentos. Con el tiempo extendido de los experimentos, la torre llena de sílice gel se satura por el aire entrante del ventilador que contiene alta humedad por las condiciones naturales del laboratorio y el país de Nicaragua, aumentando la humedad relativa del aire de secado entrante al túnel y cámara de secado.

Analizando las gráficas N_v vs X de la piña y el tomate se observa que en el inicio del secado, la piña a 100°C , presenta un período muy breve constante mientras que el tomate es decreciente inmediatamente, esto se debe a que la piña posee más resistencia a la transferencia de humedad de su interior a la superficie que el tomate, también de que no posee mucha humedad en su superficie libre para evaporar.

5.3. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECADO

Se consiguió desarrollar unas curvas características de secado coincidentes y representativas como se observa en las figuras 5.15 y 5.16 donde se logra en cada fruta que las tres curvas de f vs ϕ tengan el mismo comportamiento variando la temperatura en tres cantidades.

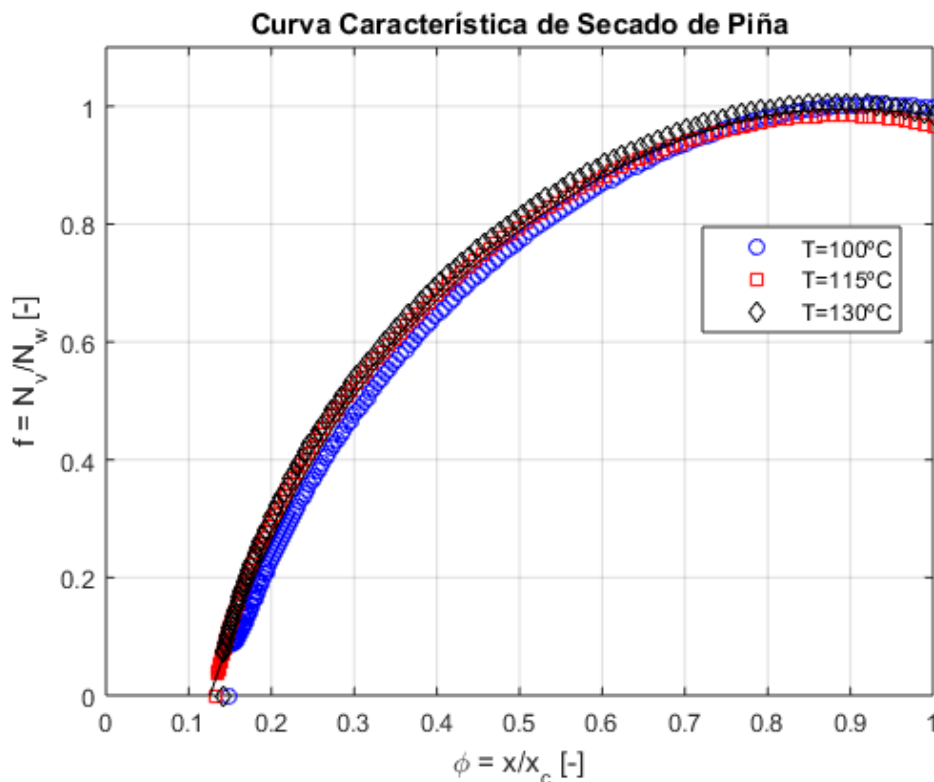


Figura 5.15. Curva característica de secado de piña a 100, 115 y 130°C .

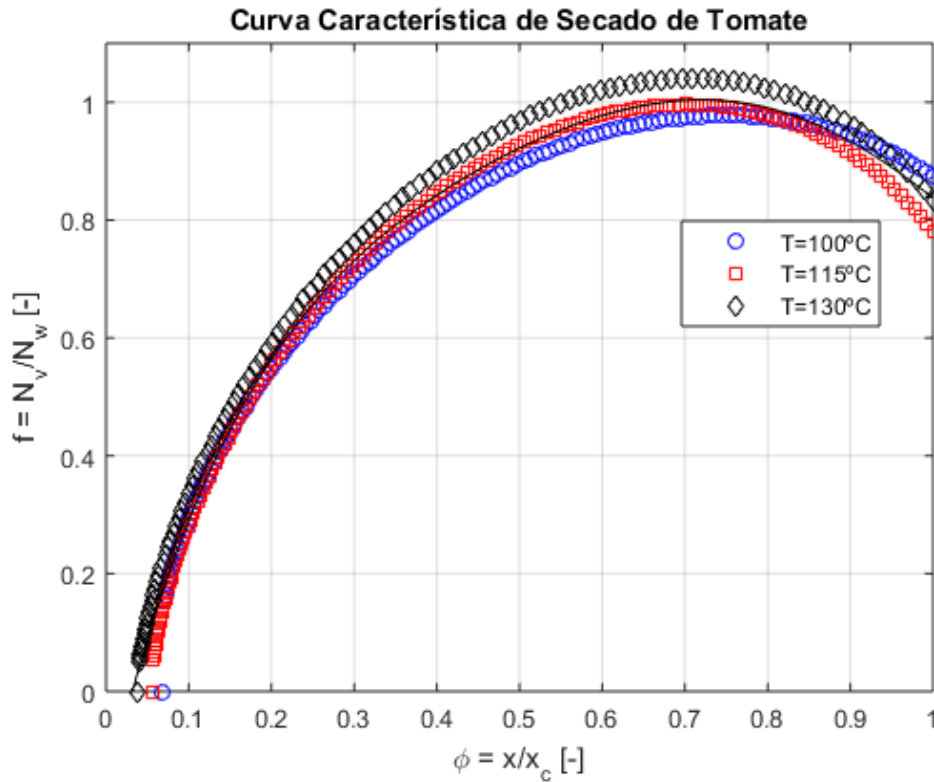


Figura 5.16. Curva característica de secado de tomate a 100, 115 y 130°C.

Se declara que ambas curvas características de secado son satisfactorias porque poseen el mismo comportamiento y la curva de ajuste polinomial se ajusta a las tres curvas. Cabe destacar que los valores fueron normalizados en el eje X-Y del valor 0 a 1, para que la generalización de las curvas se llevara a cabo.

La curva de ajuste de los datos resultó ser un polinomio de quinto orden para ambas curvas.

Ambas curvas se pueden expresar en forma del polinomio del tipo:

$$A\phi^5 + B\phi^4 + C\phi^3 + D\phi^2 + E\phi + F \quad (5.1)$$

Los valores de los coeficientes de estos polinomios se reportan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Coeficientes característicos de las CDC del tomate y piña

Coeficientes	Piña a 100, 115 y 130°C	Tomate a 100, 115 y 130°C
A	5.1691	6.1140
B	-17.8962	-20.0204
C	24.2952	24.5719
D	-17.4471	-15.6509
E	7.5861	5.9986
F	-0.7215	-0.1759

5.4. CAMBIO DE TEMPERATURA DE LA PIÑA Y TOMATE

Analizando las figuras 5.17 y 5.18, se puede observar los cambios de temperatura de la corriente gaseosa y del sólido con el tiempo, las cuales fueron directamente medidas con los correspondientes termopares. Se determina un período de incremento alto de temperatura de la piña de 20 minutos y del tomate de 10 minutos debido a la evaporación de la humedad en sus superficies no permitiendo la resistencia a la temperatura. Luego se nota un período de incremento lento en la piña hasta el minuto 80 y en el tomate hasta el minuto 45, debido al movimiento de humedad del interior hasta la superficie caracterizado por la segunda ley de Fick de difusión que lo abordamos en el capítulo 3.5. Después se determina el proceso lineal donde no existe humedad en la superficie y el transporte de humedad del interior no presenta resistencia al calor aplicado permitiendo la temperatura mantenerse constante hasta el final del experimento. El flujo de aire a la salida es mayor que el de entrada por la incorporación del agua evaporada saliente del sólido durante el experimento. La temperatura del sólido reflejada es la temperatura en su superficie.

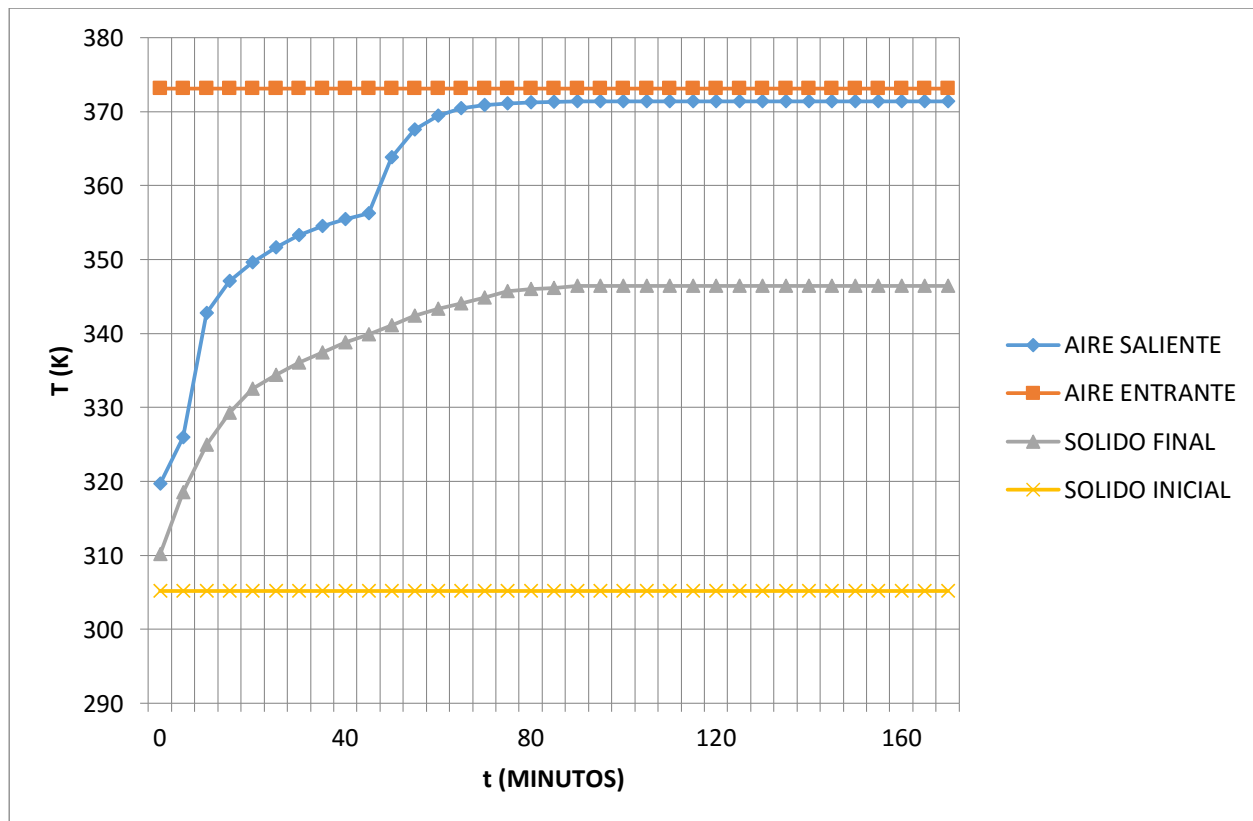


Figura 5.17. Temperatura de la piña y el aire vs tiempo.

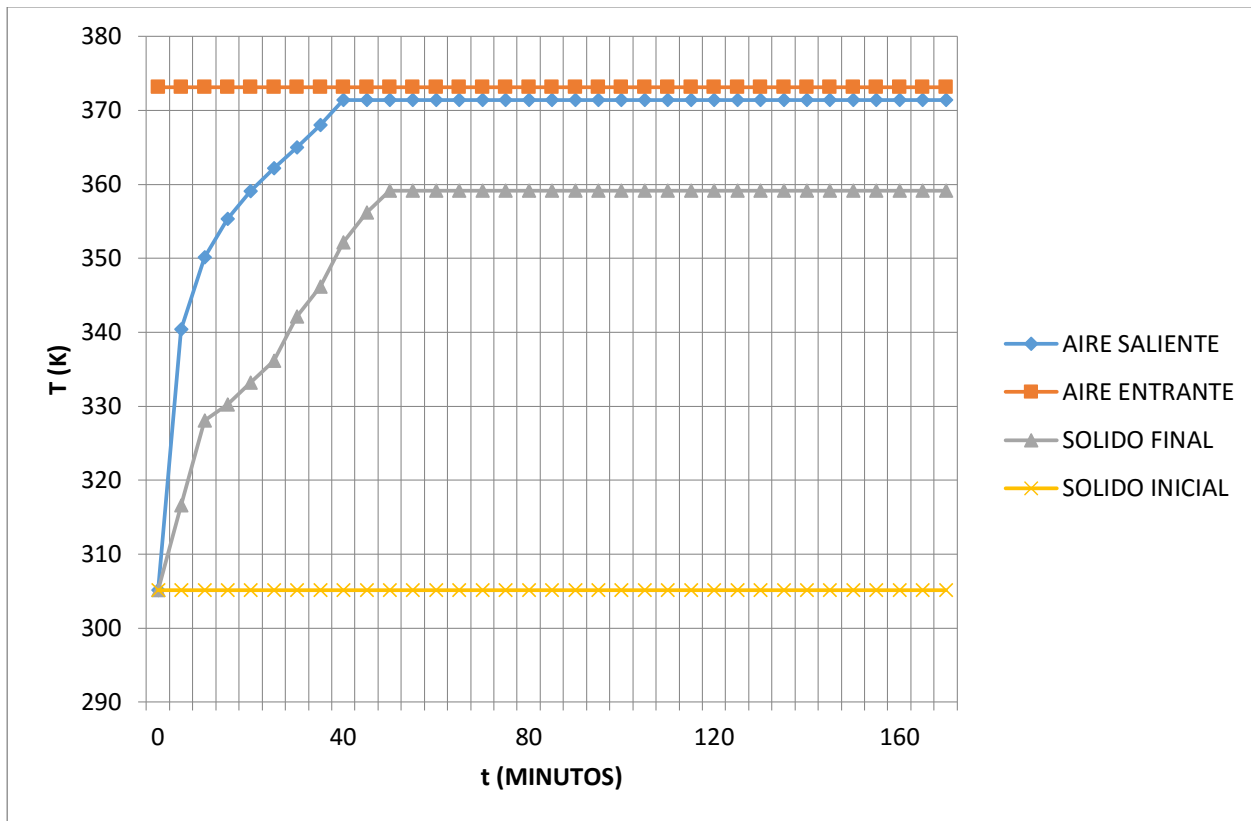


Figura 5.18. Temperatura del tomate y el aire vs tiempo.

5.5. ENTALPÍA, ENTROPÍA, EXERGÍA Y EFICIENCIA POR SEGUNDA LEY

Ocupando las ecuaciones mencionadas en el capítulo 4.4 se calcula la entalpía, entropía, exergía y la eficiencia exergética a 100°C de la piña y el tomate.

5.5.1. VARIACIÓN DE ENTALPÍA VS TIEMPO

Se midió la variación de entalpía del tomate y piña para determinar el tiempo en que tardan en llegar a su valor máximo de entalpía y las características de su curva. La cual es la cantidad de energía transferida desde el flujo de aire caliente al sólido necesario para la remoción de la humedad. Las figuras 5.19 y 5.21 muestran el comportamiento de la entalpía de entrada y salida con el tiempo de la piña y el tomate respectivamente.

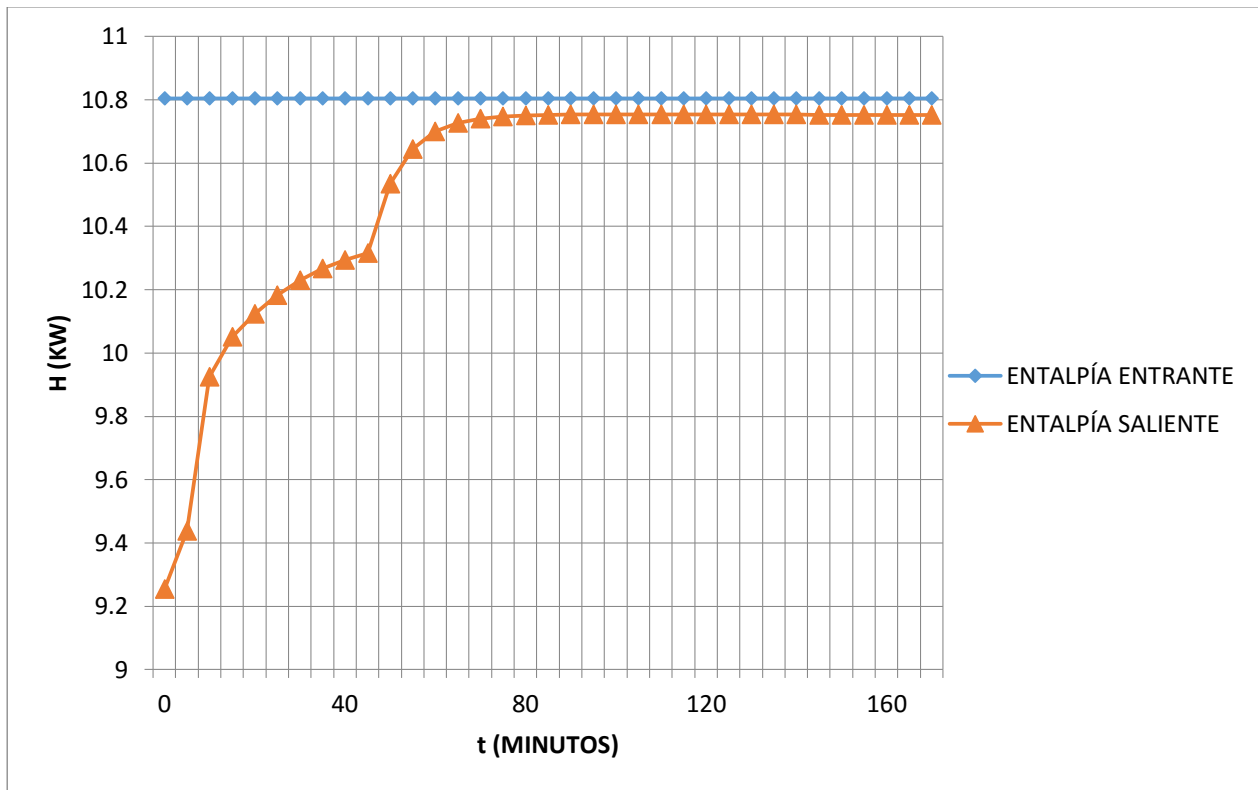


Figura 5.19. H vs T de piña a 100°C y 1.45 m/s.

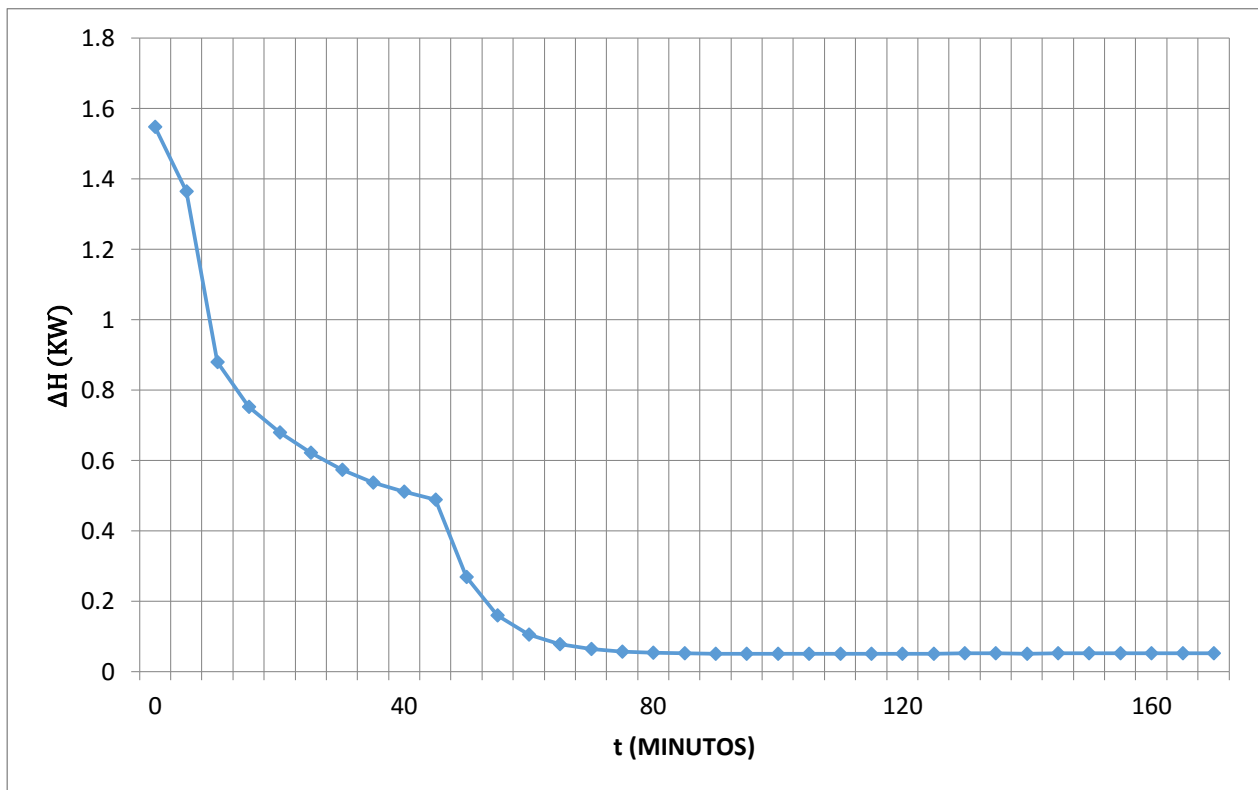


Figura 5.20. ΔH vs T de piña a 100°C y 1.45 m/s.

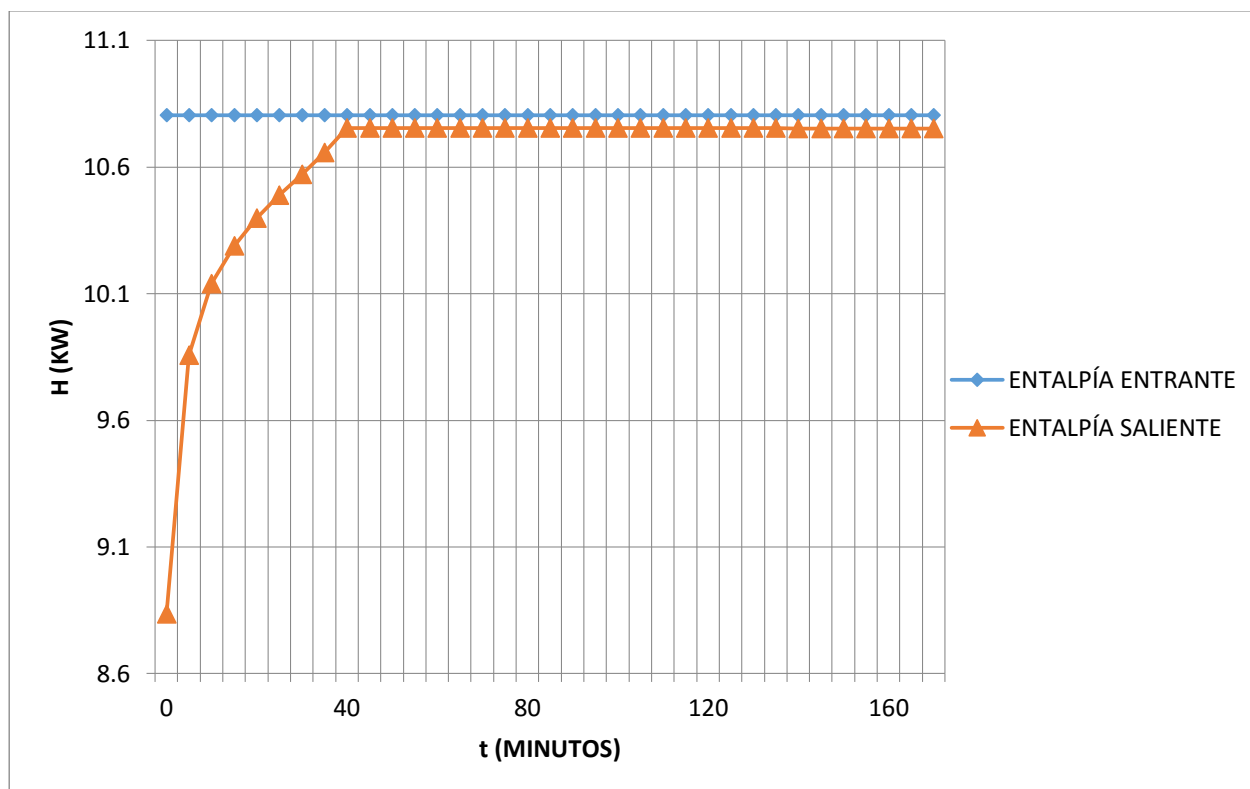


Figura 5.21. H vs T de tomate a 100°C y 1.45 m/s.

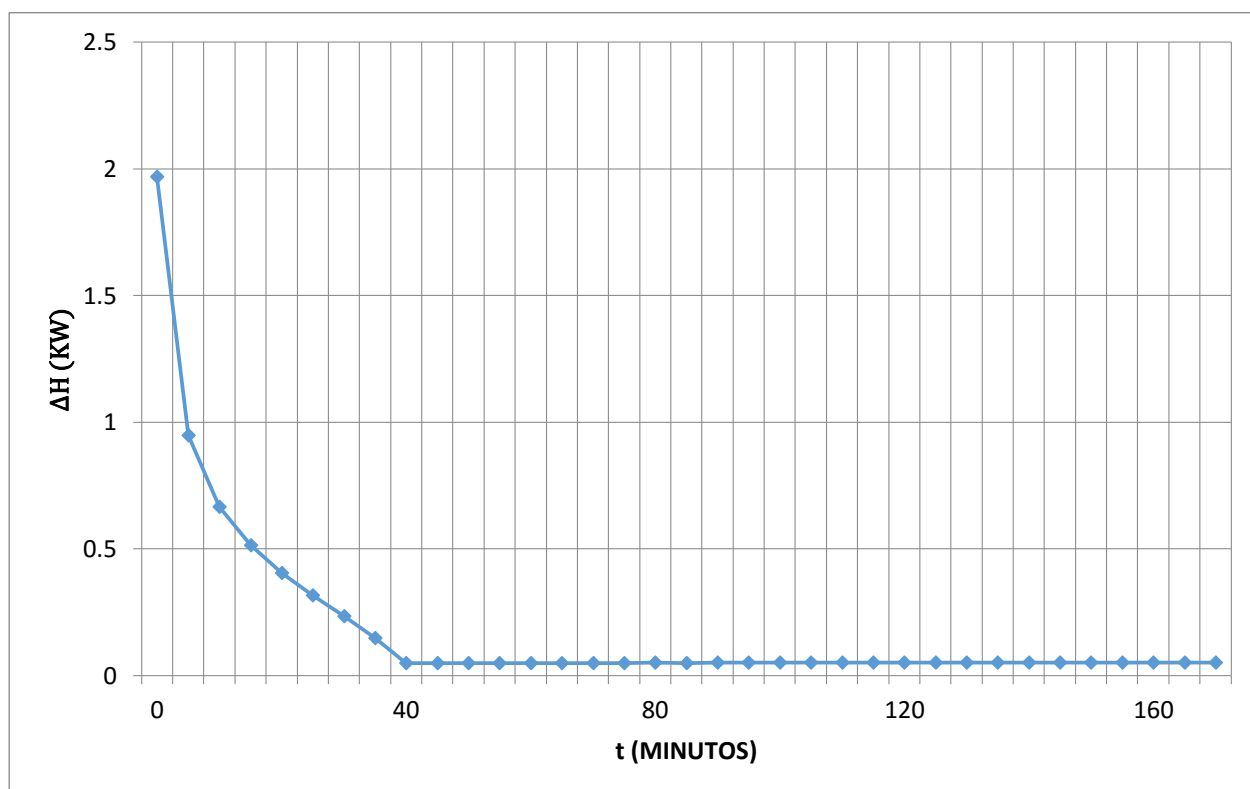


Figura 5.22. ΔH vs T de tomate a 100°C y 1.45 m/s.

Se logró determinar mediante las figuras 5.19 y 5.21 que la entalpía de la piña y el tomate experimentan un incremento con el tiempo conforme a su respectivo incremento de temperatura. Es notorio que antes de los 75 minutos y 40 minutos de la piña y el tomate respectivamente, la entalpía de salida en el caso de ambos vegetales logra un máximo muy cercano al valor de entrada y se mantiene constante hasta el final del proceso. En consecuencia, los valores de ΔH ilustrados en las figuras 5.20 y 5.22, para la piña y el tomate respectivamente muestran un decremento. Este comportamiento obedece a la reducción de la entalpía total en el sistema, o dicho de otra forma la reducción de la transferencia de calor efectiva del flujo de aire caliente hacia el vegetal que se seca.

Esto ocurre porque después del contacto con el aire caliente su temperatura llega hasta su estado de equilibrio. En este equilibrio la temperatura de la superficie sólida húmeda es la misma del bulbo húmedo del aire de secado, aquí es donde se llega al punto máximo de entalpía porque se llega al contenido crítico de humedad. Luego mientras el contenido de humedad decrece y se seca la humedad de la superficie (evaporación) más que el acceso del agua en el interior asciende a la superficie del material a secar (transferencia de masa), hacen que la entalpía permanezca constante porque el material llegó a su equilibrio con las condiciones de secado.

Comparando las dos figuras 5.19 y 5.21, se observa que ambos poseen la misma entalpía al final del experimento ($10.7525 \text{ KW} = 10.7525 \text{ KW}$).

5.5.2. VARIACIÓN DE ENTROPÍA VS TIEMPO

A continuación se calcula la variación de la entropía vs tiempo a como se muestran en las figuras 5.23 al 5.26, donde su comportamiento es similar a la variación de entalpía vs tiempo. Se calcula la entropía porque sirve para medir el grado de desorden dentro de un proceso y permite distinguir la energía útil, que es la que se convierte en su totalidad en trabajo, de la inútil, que se pierde en el medio ambiente. Con este valor y el de entalpía calcularemos la exergía del sistema.

Es importante recordar que la entropía calculada en la salida del secador experimenta un incremento importante no solo debido a la variación de temperatura, sino que también al incremento del flujo de agua en fase vapor contenida en la corriente de aire caliente debido a la evaporación del contenido de agua en el sólido. Por esa razón para ambos vegetales existe una pequeña etapa en la cual la entropía de salida aumenta levemente con respecto a la entropía de entrada (ver figuras 5.23 y 5.25). Como resultado de esta particularidad, se puede observar que el ΔS del sistema (corriente gaseosa) desciende levemente (ver figuras 5.24 y 5.26).

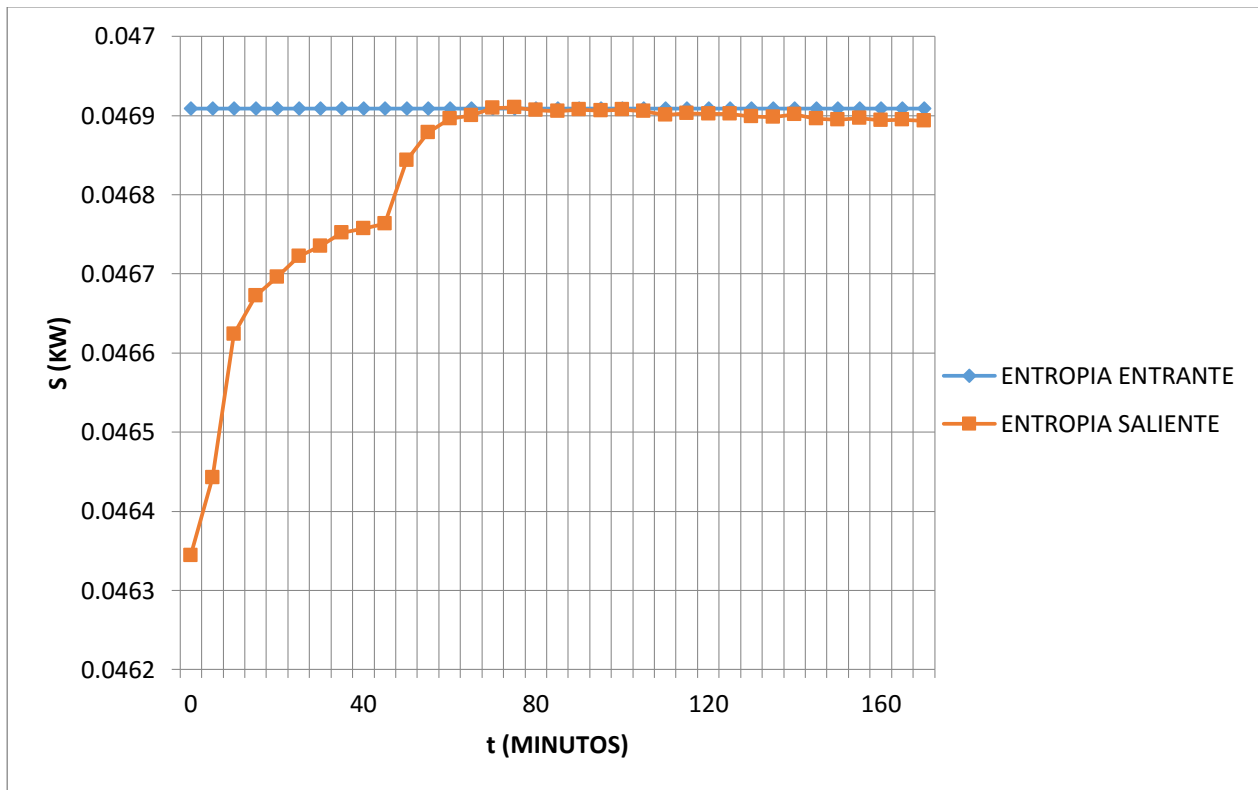


Figura 5.23. S vs tiempo de la piña a 100°C.

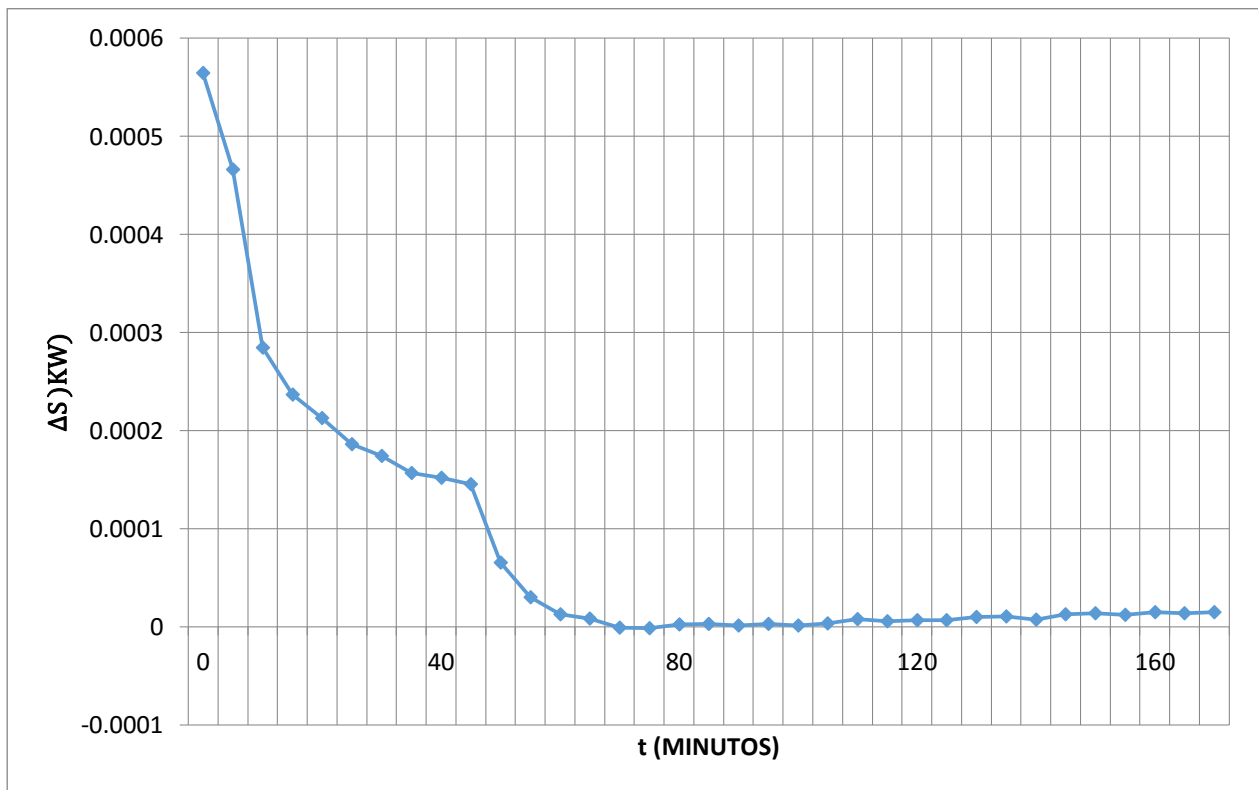


Figura 5.24. ΔS vs tiempo de la piña a 100°C.

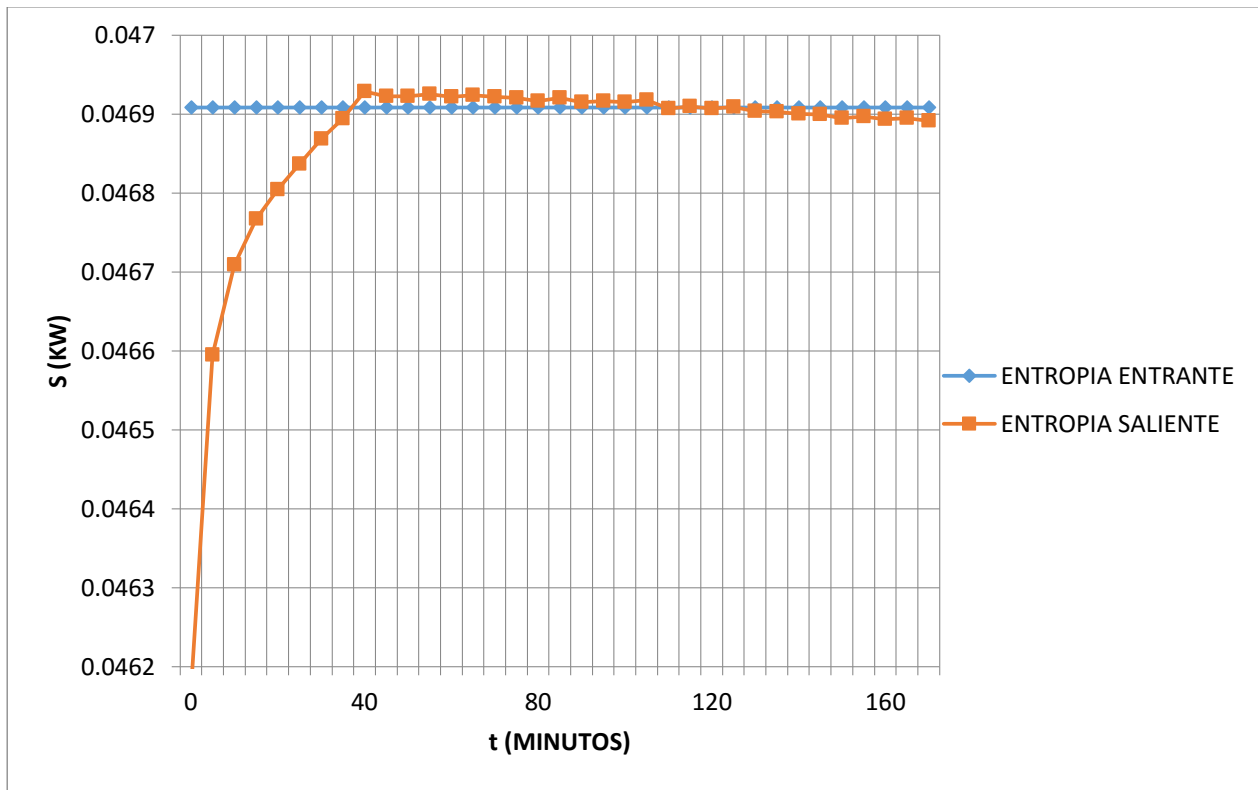


Figura 5.25. S vs tiempo del tomate a 100°C.

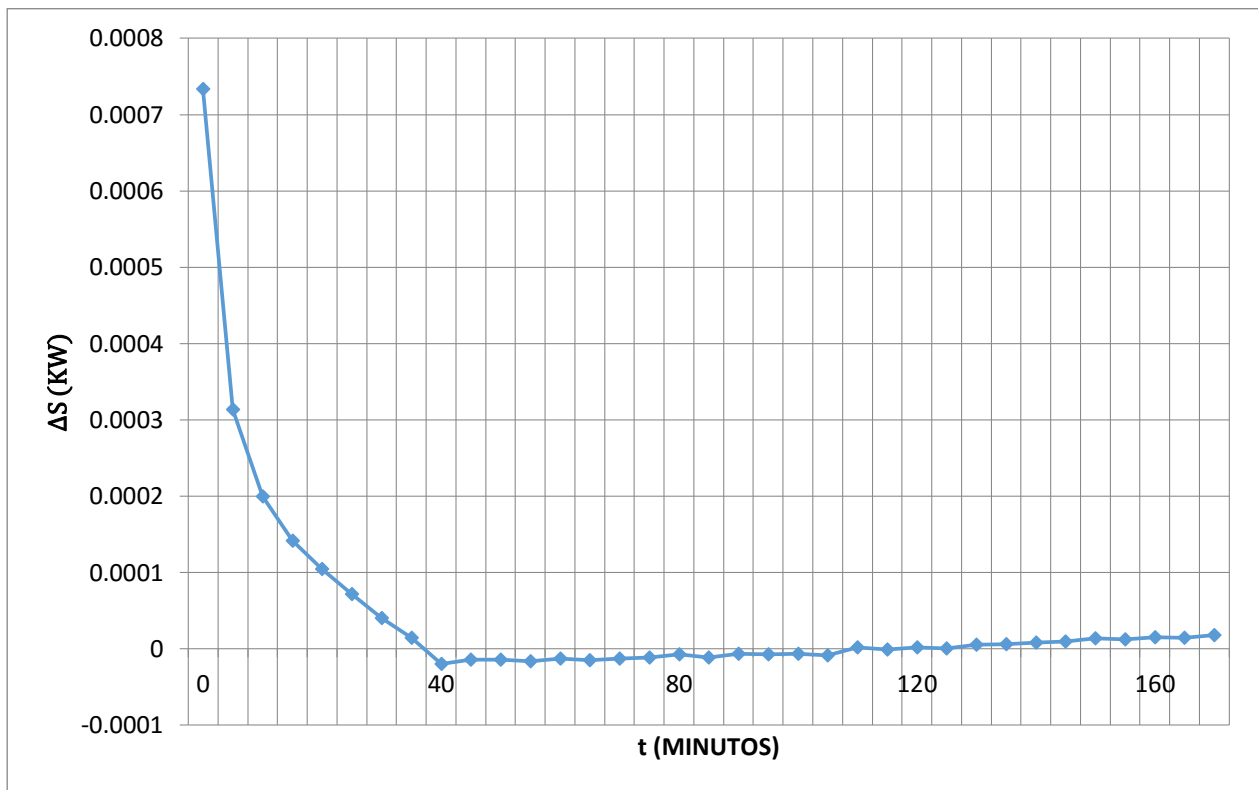


Figura 5.26. ΔS vs tiempo del tomate a 100°C.

Comparando las figuras 5.23 y 5.25 miramos que tienen el mismo comportamiento significando que comparten el índice de la cantidad de energía no disponible en su sistema termodinámico en cualquier momento de evolución. Al mantenerse constante 40 minutos el tomate y la piña 80 minutos, se pierde la capacidad de generar energía útil o se transforma en otra energía menos aprovechable. Se llega al punto del grado de desorden mínimo del sistema.

5.5.3. VARIACIÓN DE EXERGÍA VS TIEMPO

A continuación se calcula la variación de Ex vs tiempo. Calculando la exergía en el tiempo se ve la calidad de la energía y en qué momento exacto se llega a la exergía máxima (máxima calidad de energía). El cálculo de exergía correspondiente a las figuras 5.27 y 5.28 son la relación directa de las figuras 5.19 y 5.21 de entalpía y las figuras 5.23 y 5.25 de entropía de la piña y el tomate respectivamente mediante la ecuación 3.19.

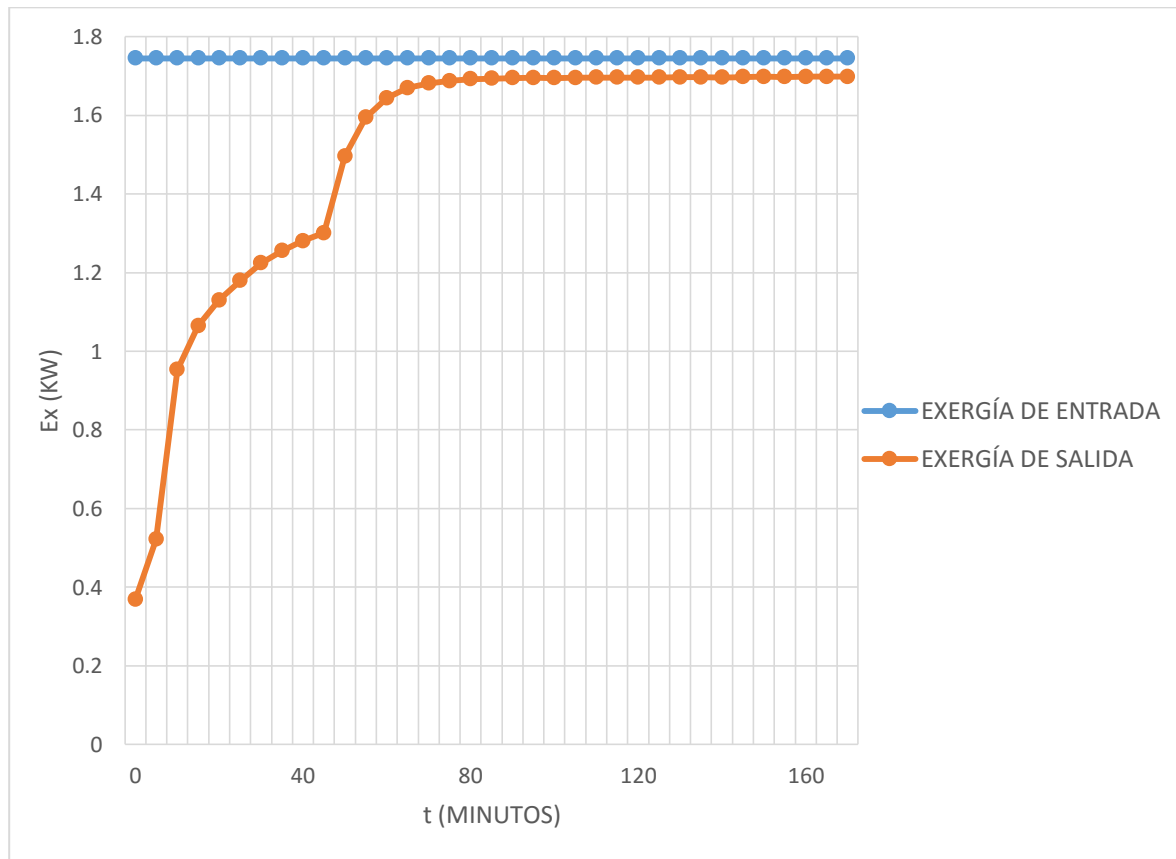


Figura 5.27. Ex vs tiempo de la piña a 100°C.

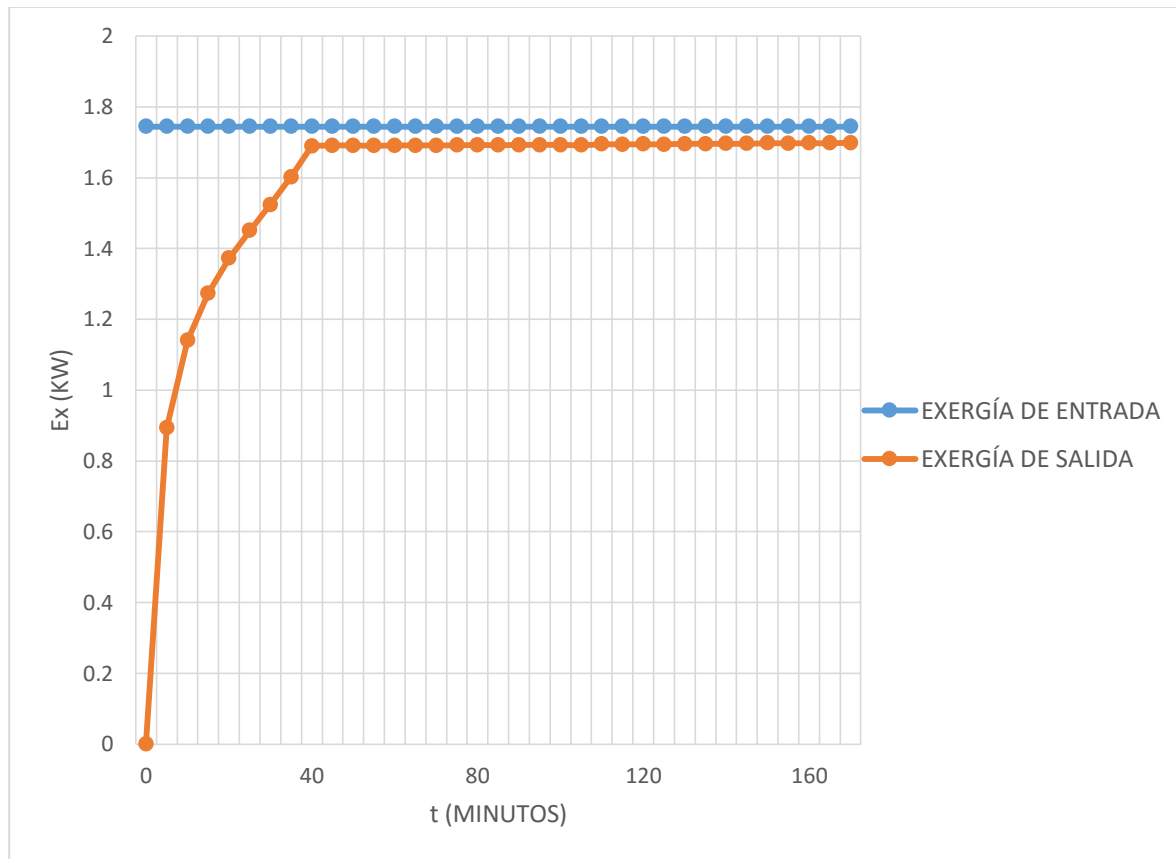


Figura 5.28. Ex vs tiempo del tomate a 100°C.

Comparando las figuras 5.27 y 5.28, se ve que la piña y el tomate respectivamente presentan casi el mismo valor de exergía ($1.6981 < 1.6986$) que significa que el sistema tienen la misma calidad de energía y que aprovechan igual la energía entrante para convertirla en trabajo puro.

En ambos casos la energía disponible de salida tiene un incremento importante debido que solo en la primer etapa (etapa ascendente) es mejor aprovechada en el proceso de evaporación el contenido de humedad de los vegetales.

El tomate a los 40 minutos comienza a mantenerse ligeramente constante cerca de su valor máximo de exergía en cambio la piña hasta los 80 minutos. Significa que el sistema del tomate es exergéticamente mejor ya que en 40 minutos menos que la piña llega a su punto más alto de conversión de energía útil en trabajo puro, brindando un valor mayor de calidad de energía viéndolo desde la segunda ley de la termodinámica y que no existe una ley de conservación para la exergía.

5.5.4. VARIACIÓN DE EFICIENCIA EXERGÉTICA VS TIEMPO

Se procede a calcular la variación de eficiencia exergética en el tiempo para determinar las fases donde se podrían mejorar las condiciones del material y del secado para ir eliminando las irreversibilidades del proceso y mejorar el aprovechamiento de la energía disponible en energía útil. Las figuras 5.29 y 5.30 ilustran el comportamiento de la eficiencia por Segunda Ley o eficiencia exergética durante el proceso de secado de la piña y el tomate respectivamente de acuerdo a la ecuación 3.25. Se ha usado un ajuste polinomial de cuarto orden en ambas curvas generadas con la finalidad de entender mejor la tendencia de ψ , debido a que los datos de velocidad de evaporación ($\dot{m}_{ag_{ev}}$) presentan mucho ruido experimental. Esta velocidad de evaporación corresponde al término $\frac{dx}{dt}$ incluida en la ecuación 3.2 de velocidad de secado.

La tendencia de la variación de la eficiencia está directamente relacionada a las curvas de velocidad de secado de la piña y el tomate a 100 °C ilustradas en las figuras 5.8 y 5.11 respectivamente. El valor máximo de la curva de la eficiencia corresponde al valor máximo que se puede observar en las curvas de velocidad de secado. Este valor máximo representa el momento en que la energía disponible es mejor utilizada en la remoción de la humedad desde el sólido. Por esa razón a medida que la velocidad de secado disminuye, la energía disponible comienza a ser menos aprovechada. Esto también puede deducirse observando de manera complementaria las figuras de exergía 5.27 y 5.28.

Comparando las gráficas 5.29 y 5.30 se observa que comparando los valores de la piña y el tomate respectivamente, el tomate posee mayor valor de eficiencia exergética en su punto más alto del experimento ($0.0077\% < 0.0119\%$) determinando que el tomate en estas condiciones del sistema y de secado es mejor que la piña en convertir la energía entrante o disponible en energía útil. Esto es debido a que su tiempo de experimento es 600 segundos menor, su humedad es mayor que el de la piña, permitiendo mayor cantidad de agua en el proceso y una mayor cantidad de agua libre en la superficie para evaporarse. También que el sólido de la piña interfiere en la evaporación por sus membranas que cubren la fruta por completo y permite mayor resistencia hacia la evaporación del agua contenida.

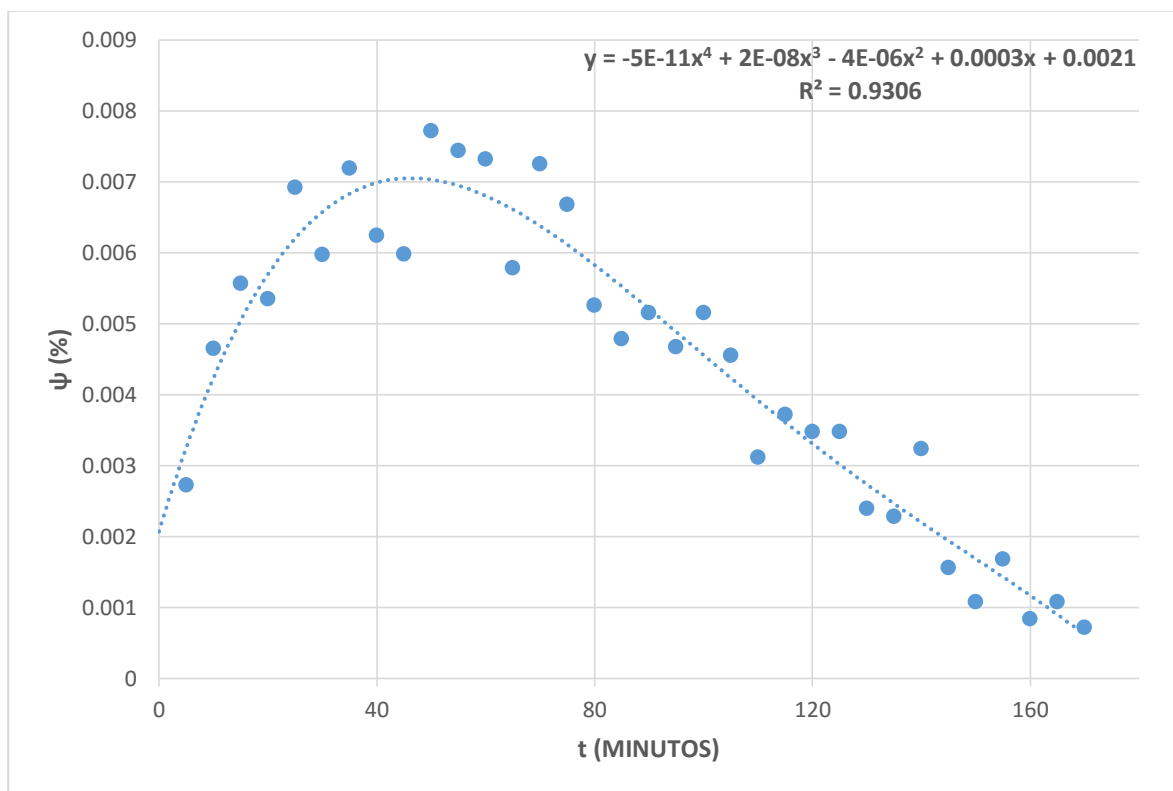


Figura 5.29. Comportamiento de ψ vs tiempo de la piña a 100°C.

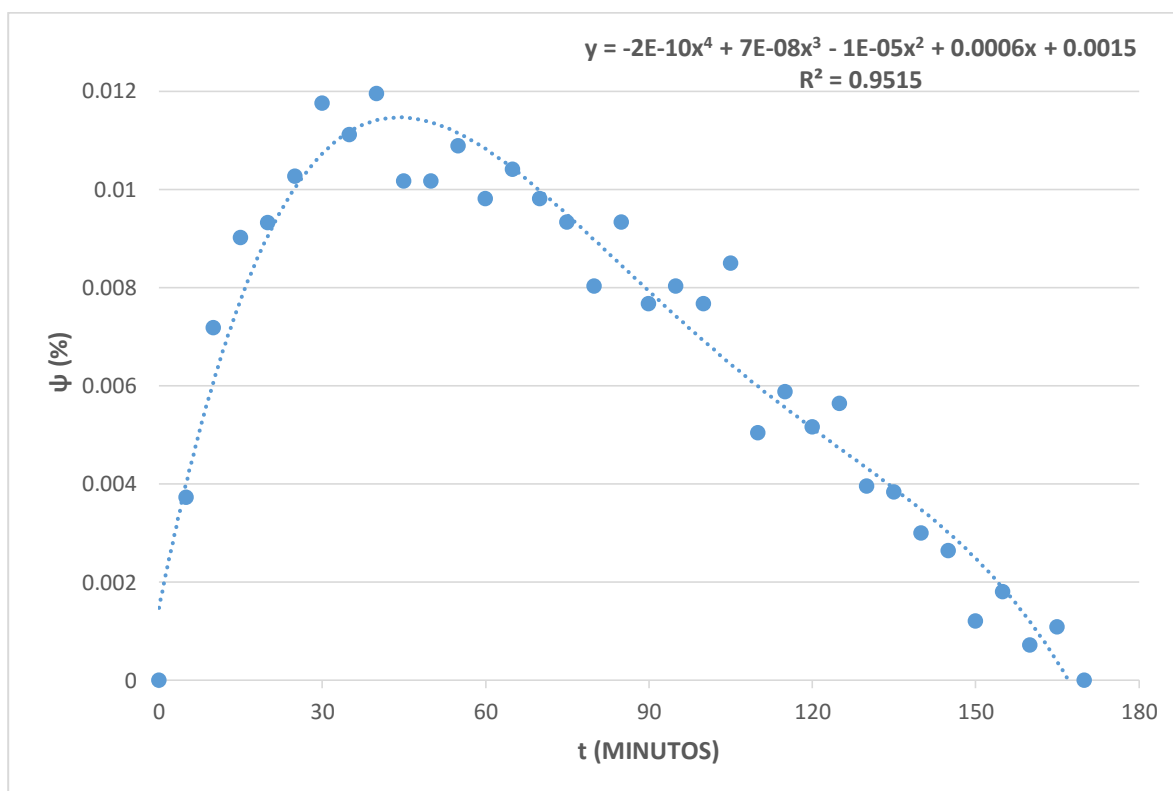


Figura 5.30. Comportamiento de ψ vs tiempo del tomate a 100°C.

Comparando los valores de eficiencia exergética obtenidos con la tabla 5.2, observamos que ambos no llegan a ningún valor aceptable en comparación con los de la tabla. Hay que tomar en cuenta que el secado por aire caliente es el que posee entre todos los otros métodos de secado, las mayores pérdidas exergéticas por la salida del aire caliente, se introduce poca exergía durante el proceso al sólido a secar y hay bastantes pérdidas en las paredes del secador por su tamaño aun incluso estando insulado. También influye que el secador es experimental y la muestra a secar es pequeña en comparación a las dimensiones del secador.

Tabla 5.2. Eficiencias energéticas y exergéticas de algunos procesos térmicos.

Utilization	Energy efficiency	Exergy efficiency
Large-scale electricity generation or traction	0.90–0.95	0.30
Industrial steam production	0.85	0.25
Fluidized-bed drying	0.15–0.30	0.06–0.10
Heat pump drying	0.88	0.05
Transportation (diesel powered)	0.40	0.10
Transportation (gasoline powered)	0.25	0.10
Space heating or cooling	0.50–0.80	0.05
Domestic water heating	0.50–0.70	0.05
Incandescent lightbulb	0.05	0.05

Source: Dincer (1998).

Analizando las condiciones y el equipo con la teoría, se encuentra que aumentado el flujo másico del sólido disminuye la exergía. Aumentando el flujo másico del aire de entrada no afecta considerablemente la exergía, por lo tanto hay que utilizar y calcular el flujo óptimo para aumentar la eficiencia exergética. La exergía aumenta incrementando la masa del sólido a secar, como este experimento fue realizado con un secador experimental, en el cual se suele usar flujo de aire muy grandes con respecto al agua a ser evaporada surgieron bajos valores de eficiencia exergética. No obstante, en el diseño de un secador industrial se debe de tomar en consideración una relación apropiada entre el flujo de aire y el agua a evaporarse para un mejor aprovechamiento de la energía disponible. Con el incremento de la temperatura del aire entrante de secado se disminuye la exergía ya que se utiliza más energía en calentar el aire entrante.

Analizando los resultados obtenidos en un punto de vista económico y de gestión de energía abordada en los capítulos 3.12 y 3.13, podemos notar que ambos procesos tienen un valor bajo de eficiencia exergética porque se ocupa energía térmica que es considerada una de las más costosas en la industria y que al final del proceso el calor de desecho se libera al ambiente, en vez de servir la necesidad de otro proceso o algún otro uso.

También de que se ocupa un mismo grado y calidad de energía sin variantes durante el proceso, cuando se podría maximizar dependiendo de las necesidades de las tareas. Aunque la diferencia de

valores de eficiencia exergética entre ambos no sea mucho (0.002%), el tomate es el más ideal en términos de uso de energía, reducciones de costo energéticos y más amigable con el medio ambiente.

6. CONCLUSIONES

Se lograron obtener las curvas características de la piña y el tomate mediante la normalización de las curvas de secado, con lo cual se han obtenido curvas a tres diferentes temperaturas satisfactoriamente coincidentes para obtener una curva generalizada mediante la aplicación de un ajuste polinomial de quinto orden. Estas curvas podrán integrarse a la base de datos existente en la Facultad de Ingeniería Química, iniciada por Sánchez (1993), y que se podrán ocupar para modelación y simulación de cualquier proceso que ocupe estas dos frutas con fines de evaluación o diseño de secadores adecuados a esos vegetales.

En el desarrollo de los cálculos de entalpía y entropía se concluye que ambos tienen el mismo valor de entalpía ($10.7525 = 10.7525$) e igual valor de entropía ($0.04689 = 0.04689$), lo que significa que utilizan la misma energía y poseen igual grado de irreversibilidad asociado a esa energía, porque ambos tienen humedad libre en su superficie y que al evaporarse se une a la corriente de aire seco aumentando el valor de entalpía.

Se logró determinar la exergía y eficiencia exergética en el tiempo de la piña y el tomate respectivamente donde sus valores de exergía son prácticamente iguales ($1.6981 > 1.6978$) pero varían en sus valores de eficiencia exergética ($0.0077\% < 0.0119\%$) siendo el tomate el más ideal exergéticamente. Al graficarlos se concluye que el tomate logra en menos tiempo alcanzar su valor máximo de exergía y eficiencia exergética determinando que es el mejor de los dos en términos de la segunda ley de la termodinámica, convirtiendo la mayor de cantidad de energía disponible en energía útil comparándolo en referencia con el ambiente, significando que económicamente es más viable y más eficiente ambientalmente que la piña.

Se concluye que el tomate es el más ideal en términos de uso de energía, reducciones de costo energéticos y más amigable con el medio ambiente porque es 0.0042% mayor en eficiencia exergética comparado a la piña, alcanzando más rápido sus valores máximos de entalpía, entropía, exergía y logra llegar a su equilibrio térmico 10 minutos antes que la piña.

La eficiencia exergética es directamente dependiente del flujo de evaporación y dado que el secado convectivo es menos eficiente que otros tipos de secado, es comprensible que la eficiencia por segunda ley tenga valores relativamente bajos.

Del análisis energético de los procesos de secado de piña y tomate se puede concluir que las variables controladas permiten la mejora del uso eficiente de la energía empleada, por ejemplo mediante el cambio de relación de flujos y el control adecuado de las temperaturas.

7. RECOMENDACIONES

Las curvas características de secado pueden ser utilizadas como herramientas confiables para cálculos de evaluación y diseño de diferentes tipos de secadores para frutas y verduras.

Debido a que los rangos de eficiencia de segunda ley son relativamente bajos, pese a que el tomate entra en un rango aceptable, se recomienda escalar el proceso usando otro tipo de mecanismo de secado diferente al meramente convectivo. Por ejemplo, el secado en lecho fluidizado, que incluye un componente de convección resulta con una mayor eficiencia.

Realizar un estudio de pre-factibilidad para instalar una planta de secado de tomate y piña para su aprovechamiento diverso en el sector alimenticio utilizando el equipo cercano a su máxima eficiencia exergética.

8. NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades
Ex	Exergía	Kw
ex	Exergía específica	KJ
\dot{Q}	Flujo de calor	J/s
A	Área	cm^2
C_p	Calor específico a presión constante	$kJ/kg^{\circ}C$
T	Temperatura	$^{\circ}C$
X_c	Humedad crítica	–
N_w	Máxima velocidad obtenida experimentalmente	–
f	Velocidad relativa	–
D	Coeficiente de difusión	cm^2/seg
D_{ef}	Difusividad efectiva	–
d	Derivada	–
C	Concentración	–
E	Energía acumulable	J
g	Gravedad	m/s^2
H	Entalpía	KJ
\dot{H}	Flujo de entalpía	KJ
\hat{h}	Entalpía total específica	KJ
KE	Energía cinética	J
Ln	Logaritmo natural	–
m	Masa	Kg
N_v	Velocidad de evaporación	$g\text{ agua}/cm^2*min$
P	Presión	kPa
S	Entropía	Kw
\dot{S}_i	Flujo de entropía	Kw/min

PE	Energía potencial	J
Q	Calor	J
R	Resistencia térmica	$\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$
t	Tiempo	min
U	Energía interna	J
V	Velocidad	m/s
W	Trabajo	J
m	Flujo másico	g/min
X	Contenido de humedad	g agua/g solido seco
z	Coordenada espacial	m
Z	Elevación	m

Subíndices

Símbolo	Definición
cr	Punto critico
p	Producto
s	Sólido seco
a	Aire
as	Aire seco
ag	Agua
i	Entrada
o	Salida
g	Gas
0	Inicial
cv	Volumen de control
n	Contador
sol	Sólido

Letras griegas, coptas y latín

Símbolo	Definición	Unidades
ϕ	Contenido característico de humedad	—
Δ	Delta (variación)	—
ψ	Eficiencia exergética	—
η	Eficiencia energética	—
ρ	Densidad	—
ω	Humedad	—

9. BIBLIOGRAFÍA

- Belitz, H. D., Grosch, W. y Schieberle, P. (2009). *Food Chemistry*, Springer.
- Borgnakke, C. y Sonntag, R. E. (2009). *Fundamentals of Thermodynamics*, Fowley, Don.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*, Oxford Science Publications.
- De Oliveira, S. (2012). *Exergy: Production, Cost and Renewability*, Springer.
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos 2a Ed*, Universidad de Antioquia.
- Dincer, I. y Rosen, M. A. (2007). *Exergy Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier.
- Hui, Y. H., Chen, F., Nollet, L. M. L., Guiné, R. P. F., et al. (2010). *Handbook of Fruit and Vegetable Flavors*, Wiley.
- León, M., Lozano, E., Martínez, J. y Gamero, R. (2006). Mass Transfer During The Isothermal Drying Of Acetylsalicylic Acid. XXII Congreso Interamericano de Ingeniería Química y V Congreso Argentino De Ingeniería Química. Buenos Aires, Argentina.
- Montgomery, D. C. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*, Limusa Wiley.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying, Third Edition*, Taylor y Francis.
- Mujumdar, A. S. (2007). Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.) *Handbook Of Industrial Drying*. 3ra ed. New York: CRC Press.
- Pulido, H. G. y de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*, McGraw-Hill.
- Sanchez, L. (1993). Determinación De Curvas Características De Secado De Algunos Vegetales De Importancia Comercial. Managua, Nicaragua: Facultad De Ingeniería Química, UNI.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C. y Abbott, M. M. (2005). *Intoduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw Hill.
- Strumillo, C., Jones, P. L. y Zylla, R. (2007). Energy Aspects in Drying. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.) *Handbook Of Industrial Drying*. 3ra ed. New York: CRC Press.
- Strumillo, C. y Kudra, T. (1986). *Drying: Principles, Applications, Design*, Gordon and Breach Science Publishers.

10. APÉNDICE

TABLA A.1: Composición química de la piña por cada 100 gramos.

Calorías	62 gr
Proteínas	0.5 gr
Agua	83.6 gr
Hidratos de Carbono	13.9 gr
Fibra	1.2 gr
Calcio	12 mg
Hierro	0.5 mg
Yodo	30 mcg
Magnesio	14 mg
Cinc	0.15 mg
Sodio	2 mg
Potasio	250 mg
Vitamina A	13 mcg
Vitamina B1	0.07 mg
Vitamina B2	0.02 mg
Vitamina B3	0.3 mg
Vitamina B6	0.09 mcg
Vitamina B9	11 mcg
Vitamina C	20 mg

TABLA A.2: Composición química del tomate por cada 100 gramos.

Agua	94%
Hidratos de Carbono	3% (Fibra 1%)
Proteína	1%
Lípidos	0.3%
Potasio	258 mg / 100
Sodio	3 mg / 100
Calcio	10 mg / 100
Hierro	0.6 mg / 100
Fosforo	24 mg / 100
Vitamina A (Retinol)	207 mg / 100
Tiamina (Vitamina B1)	0.06 mg / 100
Riboflavina (Vitamina B2)	0.04g / 100